

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

PAR
ERNESTO CORNIELES

ÉTUDE THÉORIQUE ET EXPÉRIMENTALE D'UN RÉSONATEUR ULTRASONORE
COMPOSÉ : DÉVELOPPEMENT D'UN LOGICIEL BASÉ SUR L'ANALOGIE
DES LIGNES ÉLECTRIQUES

NOVEMBRE 1992

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

"À ma famille et à mes amis"

RÉSUMÉ

Une nouvelle technique de caractérisation des pâtes à papier est étudiée au laboratoire d'ultrasonique et capteurs de l'Université du Québec à Trois-Rivières. Elle est basée sur le fait que les fibres de cellulose en suspension dans l'eau soumise à un champ ultrasonore intense dans une cellule spéciale ont des mouvements ordonnés qui dépendent de la distribution des dimensions des fibres dans l'échantillon. Deux transducteurs piézoélectriques composés sont placés face à face à une distance de quelques centimètres avec un liquide intermédiaire constituant un résonateur ultrasonore et capable de produire un champ ultrasonore.

L'étude envisagée a permis la mise au point d'un programme pour traiter le problème de deux transducteurs face à face. La méthode de calcul fait appel à la théorie des lignes électriques et à l'analogie entre la propagation des ondes électromagnétiques et celle des ondes acoustiques planes [1]. Les résultats présentés dans ce mémoire ont été obtenus à l'aide du logiciel MATLAB et du montage existant au laboratoire d'ultrasonique et capteurs. Une analyse des résultats démontre une bonne similitude entre les variables obtenues par calculs et celles du laboratoire.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué dans le Laboratoire d'Ultrasonique et Capteurs de l'Université du Québec à Trois-Rivières sous la direction du Dr Jean-Luc Dion, professeur au département d'ingénierie.

Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude pour ses efforts et ses conseils judicieux pour la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier ma petite famille : Dalia, Daniel et Barbara pour leurs efforts et compréhension pendant mes études.

Je remercie également M. Francisco Galindo qui a contribué à obtenir les résultats expérimentaux.

Je remercie toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	i
REMERCIEMENTS	ii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS	xiii
INTRODUCTION	1
1. THÉORIE	3
1.1 Théorie et modélisation des transducteurs piézoélectriques	3
1.3 Base de l'analogie avec les lignes électriques	5
1.4 L'analogie électro-acoustique	8
1.5 Modèle d'un élément piézoélectrique	10
2. RELATIONS ET EXPRESSIONS MATHÉMATIQUES	11
2.1 Développement du modèle	11
2.2 Algorithme de calcul	18
2.2.1 Algorithme de calcul pour un élément piézoélectrique	18
2.2.2 Algorithme pour deux éléments piézoélectriques	20
2.2.3 Algorithme de calcul pour trois et quatre éléments Piézoé-	
lectriques qui constituent un résonateur ultrasonore	24
3. STRUCTURE DU PROGRAMME	27
3.1 Diagramme du programme principal	27

3.2	Variables pour chaque boucle	30
3.2.1	Boucle d'un élément piézoélectrique	30
3.2.2	Boucle de deux éléments piézoélectriques	31
3.2.3	Boucle de trois et quatre éléments piézoélectriques	34
3.3	Les options de résultats pour chaque boucle	36
3.3.1	Boucle d'un élément piézoélectrique	36
3.3.2	Boucle de deux éléments piézoélectriques	37
3.3.3	Boucle de trois éléments piézoélectriques	37
3.3.4	Boucle de 4 éléments piézoélectriques	38
3.4	Fonctions de l'éditeur du text et de MatLab pour l'analyse des variables	38
3.5	Les différents algorithmes dans le programme principal	41
3.5.1	Description des différents algorithmes dans le programme principal	42
3.5.2	Boucle d'un élément piézoélectrique	42
3.5.3	Boucle de deux éléments piézoélectriques	43
3.5.4	Boucle de trois éléments piézoélectriques	43
3.5.5	Boucle de 4 éléments piézoélectriques	43
4.	RÉSULTATS	44
4.1	Simulation d'un élément piézoélectrique seul (air-air)	45
4.2	Simulation d'un élément piézoélectrique avec une couche à droite	51
4.3	Simulation d'un élément piézoélectrique avec deux couches à droite	55

4.4	Simulation d'un élément piézoélectrique avec deux couches à gauche et deux couches à droite	60
4.5	Simulation de deux barreaux (B4 et B8) en parallèle électri- quement (en série mécaniquement)	66
4.6	Simulation du transducteur T14	78
4.7	Simulation du transducteur T14 (air-eau)	87
4.8	Simulation résonateur (T14-T14 en parallèle électriquement et en série mécaniquement)	92
4.9	Simulation de trois barreaux en parallèle électriquement	99
5.	ANALYSES DES RÉSULTATS	109
5.1	Analyse des résultats d'un seul élément piézoélectrique actif	109
5.2	Analyse des résultats de deux éléments piézoélectrique actifs	109
5.3	Analyse des résultats de trois éléments piézoélectriques actifs	110
5.4	Analyse des résultats de quatre éléments piézoélectriques actifs	111
	CONCLUSION	112
	BIBLIOGRAPHIE	114
	ANNEXE	
A.	Principaux menus du programme pour les fichiers des données	118
B.	Programme de simulation réalisé sur PCMATLAB/ATMATLAB	124

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 - Données élément piézoélectrique du Fichier CH25-3.PAR	45
Tableau 2 - Résultats des max-min de $ Z $ du Fichier CH25-3.PAR	45
Tableau 3 - Résultats des arguments de l'impédance électrique du Fichier CH25-3.PAR	45
Tableau 4 - Résultats des max-min des vitesses du Fichier CH25-3.PAR	45
Tableau 5 - Données de l'élément piézoélectrique du Fichier EGEG-02.PAR	51
Tableau 6 - Données des autres milieux du Fichier EGEG-02.PAR	51
Tableau 7 - Résultats des max-min de $ Z $ du Fichier EGEG-02.PAR	51
Tableau 8 - Résultats des max-min des vitesses acoustiques aux interfaces	52
Tableau 9 - Données de l'élément piézoélectrique du Fichier B-A2EB2.PAR	55
Tableau 10 - Données des autres milieux du Fichier B-A2EB2.PAR	55
Tableau 11 - Résultats des max-min de $ Z $ du Fichier B-A2EB2.PAR	55
Tableau 12 - Résultats des max-min des vitesses acoustiques aux interfaces	56
Tableau 13 - Données de l'élément piézoélectrique du Fichier CER-COL4.PAR . .	60
Tableau 14 - Données des autres milieux du Fichier CER-COL4.PAR	60
Tableau 15 - Résultats max-min de $ Z $ du Fichier CER-COL4.PAR	61a
Tableau 16 - Résultats des max-min des vitesses aux interfaces du Fichier CER-COL4.PAR	61a
Tableau 17 - Données des éléments piézoélectriques du Fichier Réson 9.m	66
Tableau 18 - Données des autres milieux du Fichier Réson 9.m	66

Tableau 19 - Résultats des max-min $ Z $ du Fichier Réson 9.m	66
Tableau 20 - Résultats des arguments de l'impédance électrique en degrés du Fichier Réson 9.m	67
Tableau 21 - Données des éléments piézoélectriques du Fichier Réson 10.m	78
Tableau 22 - Données des autres milieux du Fichier Réson 10.m	78
Tableau 23 - Résultats des max-min de $ Z $ du Fichier Réson 10.m	79
Tableau 24 - Résultats des arguments de l'impédance électrique en degrés du Fichier Réson 10.m	79
Tableau 25 - Données des éléments piézoélectriques du Fichier Réson 4.m	87
Tableau 26 - Données des autres milieux du Fichier Réson 4.m	88
Tableau 27 - Résultats des max-min de $ Z $ du Fichier Réson 4.m	88
Tableau 28 - Résultats des arguments de l'impédance électrique en degrés du Fichier Réson 4.m	89
Tableau 29 - Données des éléments piézoélectriques du Fichier Résona 1.m	92
Tableau 30 - Données des autres milieux du Fichier Résona 1.m	93
Tableau 31 - Résultats des max-min de $ Z $ du Fichier Résona 1.m	94
Tableau 32 - Résultats des arguments de l'impédance électrique en degrés du Fichier Résona 1.m	95
Tableau 33 - Données des éléments piézoélectriques du Fichier Résona 7.m	99
Tableau 34 - Données des autres milieux du Fichier Résona 7.m	99

Tableau 35 - Résultats des max-min de $ Z $ du Fichier Résona 7.m	100
Tableau 36 - Résultats des max-min de l'impédance électrique en degrés du Fichier Résona 7.m	100

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 - Transducteur piézoélectrique	4
Figure 2 - Ligne électrique de longueur a_0 avec source V_{SA} à gauche	5
Figure 3 - Ligne électrique analogue	7
Figure 4a - Ligne électrique V_{SA} agissant seule	8
Figure 4b - Ligne électrique, source V_{SB} agissant seule	8
Figure 5 - Modèle de transducteur piézoélectrique interface électro- acoustique	10
Figure 6 - Transducteur composé	19
Figure 7 - Transducteur composé de deux éléments piézoélectriques électriquement en parallèle et mécaniquement en série	21
Figure 8 - Modèle d'un transducteur formé de deux éléments piézoélectriques	22
Figure 9 - Modèle de résonateur ultrasonore	26
Figure 10 - Diagramme - Structure du programme	29
Figure 11 - Diagramme des différentes algorithmes dans le programme principal	41
Figure 12 - Impédance électrique d'un élément piézo dans l'air	46
Figure 13 - Argument de l'impédance électrique du piézo	47
Figure 14 - Vitesse acoustique U_9 d'un élément piézo	48
Figure 15 - Vitesse acoustique U_{10} d'un élément piézo	49

Figure 16a	- Plusieurs graphiques du fichier CH25-3.PAR	50
Figure 16b	- Structure d'un résonateur à un élément piézoélectrique Fichier EGE-02.PAR	52
Figure 17	- Impédance électrique d'un piézo avec une couche à droite	53
Figure 18a	- Plusieurs graphiques du fichier EGEG-02.PAR	54
Figure 18b	- Structure d'un résonateur à un élément piézoélectrique Fichier B-A2EB2.PAR	56
Figure 19	- Impédance électrique du piézo avec deux couches à droite	57
Figure 20	- Argument de l'impédance électrique du piézo	58
Figure 21a	- Plusieurs graphiques du fichier B-A2EB2.PAR	59
Figure 21b	- Structure d'un résonateur à un élément piézoélectrique avec deux couches à droite et à gauche. Fichier CER-COL4.PAR	61b
Figure 22	- Impédance électrique du piézo avec deux couches (droite et gauche)	62
Figure 23	- Argument de l'impédance électrique (piézo avec deux couches gauche et droite)	63
Figure 24	- Plusieurs graphiques des vitesses du fichier CER-COL4.PAR	64
Figure 25a	- Plusieurs graphiques des vitesses du fichier CER-COL4.PAR	65
Figure 25b	- Structure d'un résonateur à deux éléments piézoélectriques. Fichier Réson 9.m	67
Figure 26	- Impédance électrique B4 et B8 en parallèle	68
Figure 27	- Plusieurs graphiques du fichier Réson9.m	69
Figure 28	- Impédance électrique mesure de B4 et B8 en parallèle	70

Figure 29	- Impédance électrique par simulation et mesure de B4//B8	71
Figure 30	- Argument impédance électrique de B4//B8 (simulation et mesure)	72
Figure 31	- Plusieurs graphiques des vitesses du fichier Réson9.m	73
Figure 32	- Impédance électrique transducteur B4//B8	74
Figure 33	- Impédance électrique du transducteur B4//B8	75
Figure 34	- Impédance électrique du transducteur B4//B8	76
Figure 35	- Argument de l'impédance électrique B4//B8	77
Figure 36	- Impédance électrique de T14 (simulation et mesure)	80
Figure 37	- Argument impédance électrique de T14 (simulation et mesure)	81
Figure 38	- Plusieurs graphiques du fichier Réson10.m	82
Figure 39	- Plusieurs graphiques des vitesses du fichier Réson10.m	83
Figure 40	- Impédance électrique transducteur T14	84
Figure 41	- Argument de l'impédance électrique transducteur T14	85
Figure 42	- Plusieurs graphiques des vitesses du fichier Réson10.m	86
Figure 43	- Plusieurs graphiques du fichier Réson4.m	90
Figure 44	- Plusieurs graphiques des vitesses du fichier Réson4.m	91
Figure 45	- Plusieurs graphiques du fichier Résona1.m	96
Figure 46	- Plusieurs graphiques du fichier Résona1.m	97
Figure 47a	- Plusieurs graphiques des vitesses du fichier Résona1.m	98
Figure 47b	- Structure d'un résonateur à trois éléments piézoélectriques. Fichier Résona 7.m	100
Figure 48	- Impédance électrique du résonateur (B9//B12//B10)	101

Figure 49	- Argument de l'impédance électrique du résonateur (B9//B12//B10)	102
Figure 50	- Plusieurs graphiques du fichier Résona7.m	103
Figure 51	- Plusieurs graphiques des vitesses du fichier Résona7.m	104
Figure 52	- Impédance électrique du résonateur (B9//B12//B10)	105
Figure 53	- Impédance électrique du résonateur B9//B12//B10	106
Figure 54	- Argument de l'impédance du résonateur B9//B12//B10	107
Figure 55	- Argument de l'impédance du résonateur B9//B12//B10	108
Figure 55a	- Organigramme de la boucle d'un élément piézoélectrique	125a
Figure 56	- Organigramme de la boucle de deux éléments piézoélectriques	174a
Figure 57	- Organigramme de la boucle de trois éléments piézoélectriques	197a
Figure 58	- Organigramme de la boucle d'un résonateur composé	228a

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

Symbole/ Description Abrév.

A	Surface
a	Épaisseur
aan	Épaisseur selon la valeur de n
$A-E$	Air-Eau
a_o	Épaisseur d'un élément piézoélectrique
Ap	Épaisseur
$ArgR$	Argument de l'impédance électrique du résonateur
B	Fonction complexe des ondes sinusoïdales
$b(z, t)$	Déplacement d'une particule par rapport à sa position d'équilibre
B_{o+}	Amplitude complexe des ondes sinusoïdales se propageant dans le sens positif
B_{o-}	Amplitude complexe des ondes sinusoïdales se propageant dans le sens négatif
C	Capacité électrique
C^{D33}	Constante élastique à champ D constant
C_o	Capacité électrique
Con	Capacité électrique selon la valeur de n
\cosh	Fonction cosinus hyperbolique
D_3	Champ d'induction électrique

E	Champ électrique
E_3	Champ électrique
E_{33}	Permittivité électrique à déformation constante
\exp	Fonction exponentielle
f	Fréquence en Hz
$F1, F2$	Fonctions complexes
f_i	Fréquence inférieure
f_r	Fréquence de référence
f_s	Fréquence supérieure
G	Conductance électrique
g	Fonction de propagation complexe
gg	Fonction de propagation complexe
g_{kn}	Coefficient d'atténuation selon la valeur de n
h	Constante piézoélectrique
h_{33}	Constante piézoélectrique de contrainte
I	Courant électrique
$I(z, t)$	Onde de courant
i	Nombre des couches à droite du piézoélectrique 1
ia	Nombre des milieux à gauche
id	Nombre des milieux à droite
ik	Nombre de couches entre deux transducteurs
$I1$	Courant électrique de l'élément piézoélectrique 1
$I2$	Courant électrique de l'élément piézoélectrique 2
$I3$	Courant électrique de l'élément piézoélectrique 3

I_4	Courant électrique de l'élément piézoélectrique 4
j	Fonction complexe
KK_0	Constante de phase
K_0	Coefficient d'atténuation
K_{I0}	Constante de phase
K_r	Coefficient d'atténuation
K_{I0}	Coefficient d'atténuation
L	Inductance électrique
M_x	Vecteur des valeurs maximums
M_n	Vecteur des valeurs maximums selon n
M_{nn}	Vecteurs des valeurs minimums selon n
N	Exposant
n_i	Nombre d'intervalles
N_n	Exposant
N_n	Exposant selon la valeur de n
P	Pression acoustique
P_i	Valeur de π
P_1, P_2	Polarisation
Q	Charge électrique
R	Résistance électrique
R	Unité de l'impédance caractéristique en rayls
S	Déformation relative
\sinh	Fonction sinus hyperbolique
S_3	Déformation relative direction 3

T	Contrainte
T_{14}	Transducteur piézoélectrique
t	Temps
T_A, T_B	Représentent les contraintes dans le milieu piézoélectrique
\tanh	Fonction tangente hyperbolique
T_{-1}, T_1	Représentent les contraintes dans les milieux adjacents à l'interface
T_3	Contrainte direction 3
U	Vitesse acoustique
$ U $	Module de la vitesse acoustique
U_A, U_B	Vitesses acoustiques aux interfaces A et B
U_n	Vitesse acoustique selon la valeur de n
U_{1A}	Vitesse acoustique à la phase A du piézoélectrique 1
U_{1B}	Vitesse acoustique à la phase B du piézoélectrique 1
U_{2A}	Vitesse acoustique à la phase A du piézoélectrique 2
U_{2B}	Vitesse acoustique à la phase B du piézoélectrique 2
U_{3A}	Vitesse acoustique à la phase A du piézoélectrique 3
U_{3B}	Vitesse acoustique à la phase B du piézoélectrique 3
U_{4A}	Vitesse acoustique à la phase A du piézoélectrique 4
U_{4B}	Vitesse acoustique à la phase B du piézoélectrique 4
V	Tension électrique
$V(z, t)$	Onde de tension
v_e	Vitesse acoustique quand l'élément piézoélectrique est en court-circuit
V_n	Vitesse acoustique selon la valeur de n
V_s	Tension électrique

W	Pulsation en rd/s
XA	Argument de l'impédance électrique du résonateur
$ Z $	Module de l'impédance électrique
Z_+	Impédance caractéristique présentés par la face du transducteur électrique
$ZA1$	Impédance à gauche du système
Z_g	Impédance caractéristique à gauche du piézoélectrique
Z_d	Impédance caractéristique à droite du piézoélectrique
Z_E	Impédance électrique
$Ze1$	Impédance électrique du transducteur 1
$Ze2$	Impédance électrique du transducteur 2
Z_{en}	Impédance électrique selon la valeur de n
Zn	Impédance caractéristique du milieu selon n
Z_o	Impédance caractéristique de la ligne
$Z_o (AC)$	Impédance caractéristique acoustique
$Z_o (EL)$	Impédance caractéristique de la ligne électrique
Zon	Impédance caractéristique du piézoélectrique selon la valeur de n
Zop	Impédance caractéristique du milieu
$Z2$	Impédance à droite du système
$Z10$	Impédance caractéristique du milieu
$ZP1$	Impédance caractéristique du piézoélectrique 1
$ZP2$	Impédance caractéristique du piézoélectrique 2
$ZP3$	Impédance caractéristique du piézoélectrique 3
$ZP4$	Impédance caractéristique du piézoélectrique 4
ZRT	Impédance électrique du résonateur

ZZ1	Impédance électrique élément piézoélectrique 1
ZZ2	Impédance électrique élément piézoélectrique 2
ZZ3	Impédance électrique élément piézoélectrique 3
ZZ4	Impédance électrique élément piézoélectrique 4
ρ	Masse volumique
∂	Fonction dérivée partielle
\varnothing	Angle de déphasage
α	Coefficient d'atténuation ou d'affaiblissement
β	Constante de phase
γ	Fonction de propagation complexe

INTRODUCTION

On utilise couramment, depuis de nombreuses années, le modèle de Mason pour représenter un élément piézoélectrique vibrant en une dimension [12]. C'est un réseau à deux portes acoustiques et une porte électrique branchée entre les deux premières. Il est formé d'éléments discrets qui dépendent de la fréquence et dont les deux extrêmes sont égaux. On a plus tard proposé, sans le développer, un modèle constitué d'une ligne acoustique alimentée par le milieu [20], qui devait donner les mêmes résultats que le précédent. Or, ces modèles soulèvent quelques questions formelles. Premièrement, dans certaines versions du modèle de Mason, il apparaît une capacité négative C_0 qui gêne quelque peu l'intuition. Deuxièmement, la ligne ou le réseau équivalent sont alimentés par le centre [12, 20]. Troisièmement, avec le modèle de Mason utilisé tel quel, il est impossible que les vitesses acoustiques sur les faces soient égales quand les impédances des milieux adjacents sont différentes, alors que la solution rigoureuse des équations montre qu'elles le sont à la fréquence d'antirésonance, quelles que soient les charges. Cela tient à l'égalité de deux impédances du modèle [12, 20]. On est ainsi amené logiquement à tenter de placer des sources aux extrémités du modèle. Dans un précédent travail [5] qui était une première tentative de modélisation unidimensionnelle de transducteur vibrant en épaisseur, nous avons indépendamment utilisé cette dernière approche. La modélisation de deux éléments piézoélectriques a été étudiée [7] mais avec une limite de trois milieux de propagation intermédiaires.

Le but poursuivi dans ce travail est la mise au point d'un programme pour traiter le problème d'un résonateur piézoélectrique pouvant comporter de un à quatre éléments piézoélectriques et d'un nombre quelconque d'autres milieux qui est une première dans le domaine. À l'aide du logiciel MATLAB, on peut étudier plusieurs cas : un élément piézoélectrique avec plusieurs milieux à gauche et à droite, deux éléments piézoélectriques constituant un transducteur, trois et quatre éléments piézoélectriques constituant un résonateur ultrasonore. Les programmes ont été faits avec le format MATLAB. Avec la puissance de ce logiciel, on peut visualiser sur l'écran l'impédance électrique de chaque élément piézoélectrique, les différentes vitesses acoustiques aux interfaces, et on peut aussi superposer toutes les courbes sur un même graphique ainsi que faire l'analyse de toutes les variables.

La méthode de calcul utilisée est celle qu'a développée M. Dion [1] qui utilise la théorie de lignes électriques, et qui donne le modèle du transducteur en utilisant l'analogie électro-acoustique. On utilise aussi le théorème de superposition pour calculer les vitesses acoustiques aux interfaces, car le modèle développé [1] présente la source de tension linéairement indépendante et la réponse est en fonction de cette tension.

1. THÉORIE

1.1 Théorie et modélisation des transducteurs piézoélectriques

La présente modélisation d'un transducteur piézoélectrique découle d'une application rigoureuse de l'analogie entre un milieu de propagation acoustique unidimensionnel et une ligne électrique.

Dans le cas d'un milieu piézoélectrique à faces parallèles, les contraintes qui apparaissent sous l'effet d'un champ électrique imposé sont distribuées dans la masse d'une face à l'autre. Toutefois, l'examen de l'équation de propagation des ondes acoustiques dans un tel milieu montre que les contraintes sources peuvent être associées aux faces [3]. À la suite d'une variation de tension électrique, on sait d'ailleurs expérimentalement qu'une perturbation acoustique part de chaque face l'une vers l'autre [3].

C'est ce qui a amené initialement M. Dion à considérer l'analogie avec une ligne électrique ayant une source à chaque extrémité.

Le système considéré est représenté à la figure 1. C'est un système où les déplacements sont unidimensionnels, suivant l'axe des Z . Il est constitué d'un élément piézoélectrique 0 d'épaisseur a_0 , dont les électrodes des faces A et B sont reliées à une source de tension V . À sa gauche, un milieu quelconque présentant une impédance acoustique Z_{-1} de façon générale. À sa droite, un milieu 1 présentant une impédance Z_1 . D'une façon générale, il peut y avoir un nombre quelconque de milieux à gauche et à droite du piézoélectrique. U_A et U_B sont les vitesses acoustiques aux interfaces A et B. T_A et T_B représentent les contraintes dans le milieu piézoélectrique; T_{-1} et T_1 sont les

contraintes dans les milieux adjacents, à l'interface. Dans le piézoélectrique, la contrainte dépend à la fois de la déformation et du champ électrique. Or, la propagation des ondes acoustiques planes dans un milieu homogène est régie par un système d'équations mathématiquement identiques à celles qui régissent la propagation des ondes de courant et de tension sur une ligne électrique. Cette propriété est mise à profit pour établir le modèle de transducteur piézoélectrique [3].

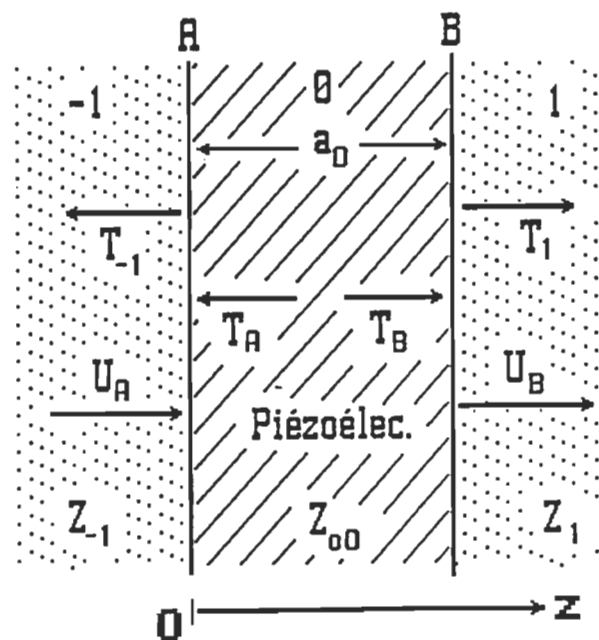


Figure 1 Transducteur piézoélectrique [3]

1.3 Base de l'analogie avec les lignes électriques

Les expressions et les schémas qu'on va développer ont été les étapes préliminaires de l'étude de la modélisation du transducteur piézoélectrique [2].

Considérons la ligne électrique représentée à la figure 2, avec une source de tension à gauche. En régime harmonique, les ondes de tension et de courant qui se propagent respectivement dans le sens positif et le sens négatif ont pour expression :

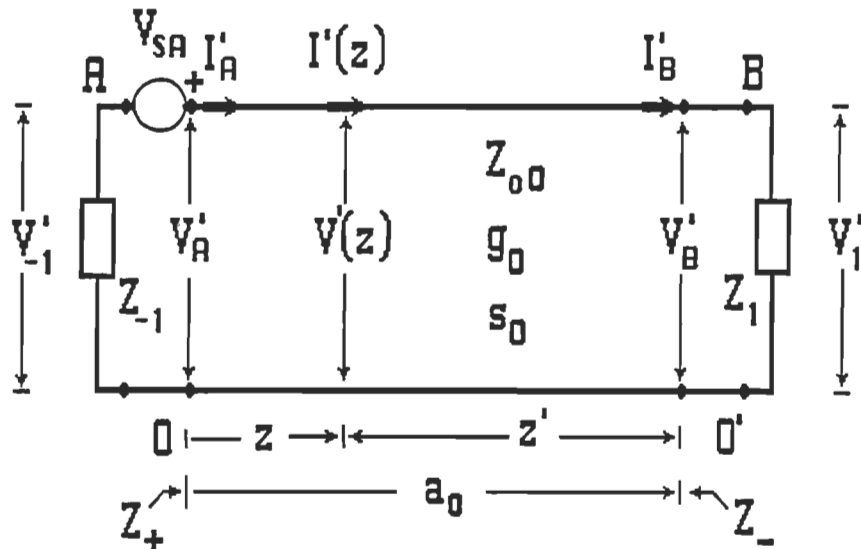


Figure 2 Ligne électrique de longueur a_0 avec source V_{SA} à gauche

En régime harmonique, les amplitudes complexes sont alors :

$$V_+(z) = V_+(0) \exp(-gz) \dots\dots\dots (1)$$

$$V_-(z) = V_-(0) \exp(+gz) \dots\dots\dots (2)$$

$$I_+(z) = I_+(0) \exp(-gz) \dots\dots\dots (3)$$

$$I_-(z) = I_-(0) \exp(+gz) \dots\dots\dots (4)$$

Les relations entre la tension et le courant pour les ondes dans les deux sens sont :

$$V_+ = Z_0 I_+ \dots\dots\dots (5)$$

$$V_- = -Z_0 I_- \dots\dots\dots (6)$$

où Z_0 est l'impédance caractéristique de la ligne. Notons que l'impédance d'entrée de la ligne est Z_+ , l'impédance vue vers la droite en O.

Or, entre la vitesse acoustique U_+ et la contrainte T_+ ($T = -P$, où P est la pression acoustique) d'une onde acoustique plane, on a la relation générale $T_+ = -Z_0 U_+$, où Z_0 est l'impédance caractéristique ou impédance d'onde du milieu.

Pour une onde plane, $Z_0 = \rho V$, où ρ est la masse volumique et V est la vitesse de propagation de l'onde.

Pour des ondes acoustiques planes se propageant dans les deux sens le long de l'axe O_z , en régime harmonique (figure 1).

$$T_+(z) = T_+(O) \exp(-gz) \dots\dots\dots (7)$$

$$T_-(z) = T_-(O) \exp(+gz) \dots\dots\dots (8)$$

$$U_+(z) = U_+(O) \exp(-gz) \dots\dots\dots (9)$$

$$U_-(z) = U_-(O) \exp(+gz) \dots\dots\dots (10)$$

Entre la pression acoustique et la vitesse acoustique, on a les relations :

$$T_+(z) = -Z_0 U_+ \dots\dots\dots (11)$$

$$T_-(z) = +Z_0 U_- \dots\dots\dots (12)$$

Il s'ensuit que toutes les relations qui s'appliquent aux lignes électriques peuvent l'être à la propagation d'ondes acoustiques planes qui sont fonction d'une seule variable d'espace.

Dans le cas d'une ligne ayant une source à chaque extrémité comme dans la figure 3, le courant et la tension en tout point résultent de la superposition de ceux produits par chaque source séparément, en vertu du théorème de superposition. Ceci est représenté dans les figures 4 et 5.

On a donc :

$$V(z) = V(z') = V'(z) + V''(z) \dots\dots\dots (13)$$

$$I(z) = I(z') = I'(z) + I''(z) \dots\dots\dots (14)$$

Où $V'(z)$ et $I'(z)$ sont causés par la source V_{SA} seule; $V''(z)$ et $I''(z)$ sont produits par la source V_{SB} seule. La théorie des lignes électriques permet de trouver les expressions de ces grandeurs en fonction des divers paramètres de la ligne et les résultats seront appliqués par analogie au problème du transducteur et résonateur.

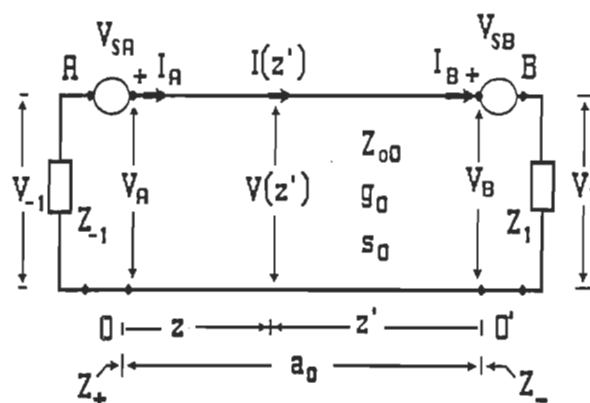


Figure 3 Ligne électrique analogue

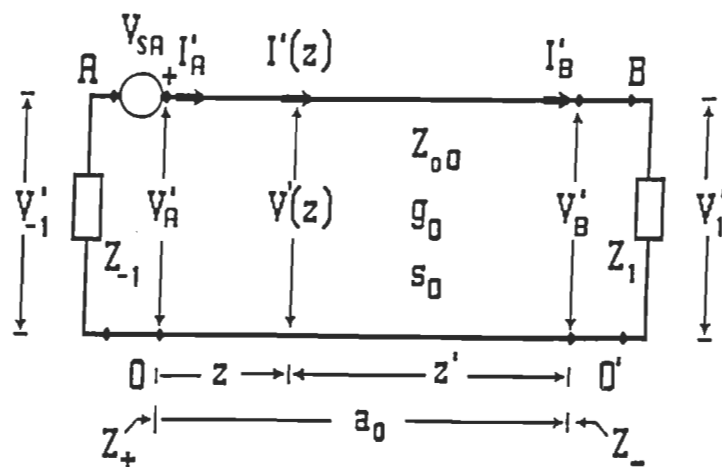


Figure 4a Ligne électrique. Source V_{SA} agissant seule

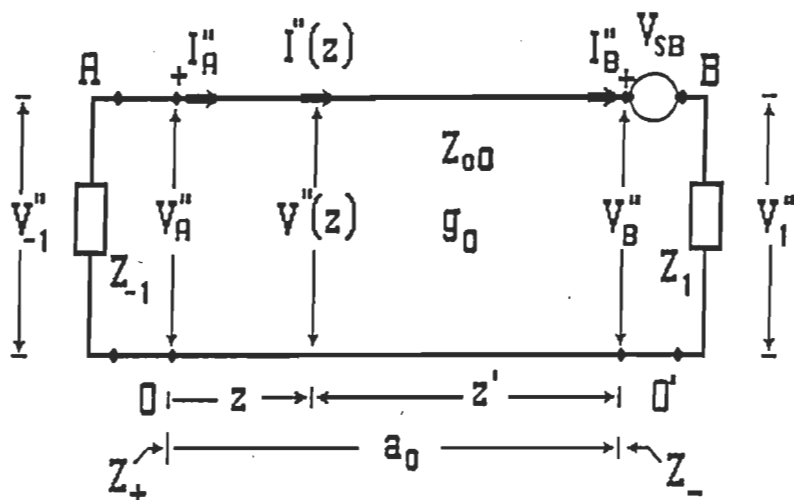


Figure 4b Ligne électrique. Source V_{SB} agissant seule

1.4 L'analogie électro-acoustique

Sur une ligne électrique uniforme peuvent se propager des ondes de tension et de courant dans les deux sens, dont les expressions complexes sont en régime harmonique.

$$V_+(z, t) = V_{o+} \exp j(\omega t - kz) = V_+(z) \exp(j\omega t) \dots\dots\dots (15)$$

$$V_-(z, t) = V_{o-} \exp j(\omega t + kz) = V_-(z) \exp(j\omega t) \dots\dots\dots (16)$$

$$i_+(z, t) = I_{o+} \exp j(\omega t - kz) = I_+(z) \exp(j\omega t) \dots\dots\dots (17)$$

$$i_-(z, t) = I_{o-} \exp j(\omega t - kz) = I_-(z) \exp(j\omega t) \dots\dots\dots (18)$$

Où

$$V_+(z) = V_{o+} \exp(-jkz) \dots\dots\dots (19)$$

$$V_-(z) = V_{o-} \exp(+jkz) \dots\dots\dots (20)$$

$$I_+(z) = I_{o+} \exp(-jkz) \dots\dots\dots (21)$$

$$I_-(z) = I_{o-} \exp(+jkz) \dots\dots\dots (22)$$

L'amplitude complexe peut s'exprimer sous la forme polaire :

$$V_{o+} = |V_{o+}| \exp(j\varnothing_+) = V_{o+} \exp(j\varnothing_+) \dots\dots\dots (23)$$

$$V_{o-} = |V_{o-}| \exp(j\varnothing_-) = V_{o-} \exp(j\varnothing_-) \dots\dots\dots (24)$$

Où \varnothing_+ et \varnothing_- sont les phases initiales à l'origine.

Il s'ensuit que l'expression réelle d'une onde de tension électrique dans le sens positif est :

$$V_+(z, t) = V_{o+} \cos(\omega t - kz + \varnothing) \dots\dots\dots (25)$$

Or, on sait que les amplitudes complexes de tension et de courant sont reliées par l'impédance caractéristique Z_o de la ligne :

$$V_+(z) = + Z_o I_+(z) \dots\dots\dots (26)$$

$$V_-(z) = - Z_o I_-(z) \dots\dots\dots (27)$$

En général :

$$Z_o = \left[\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (28)$$

Où R , L , G et C sont respectivement les paramètres linéiques de résistance, inductance, conductance et capacité. Pour une ligne sans pertes, R et G sont nuls et l'expression se réduit à $(L/C)^{1/2}$.

On observe que les relations (26) entre la tension et le courant sont exactement de la même forme que les relations (11 et 12) entre la pression et la vitesse acoustique. On dit alors que la pression acoustique est l'analogue de la tension électrique et que la vitesse acoustique est l'analogue du courant électrique. De même, l'impédance acoustique est l'analogue de l'impédance caractéristique d'une ligne dont on a le suivant :

P (pression acoustique) $\longleftrightarrow V$ (tension électrique)

U (vitesse acoustique) $\longleftrightarrow I$ (courant électrique)

Z_o (impédance caractéristique) $\longleftrightarrow Z_{oe}$ (impédance électrique)

1.5 Modèle d'un élément piézoélectrique

L'évolution de cette approche a donné le modèle de la figure 5.[6] qui est utilisé au chapitre suivant.

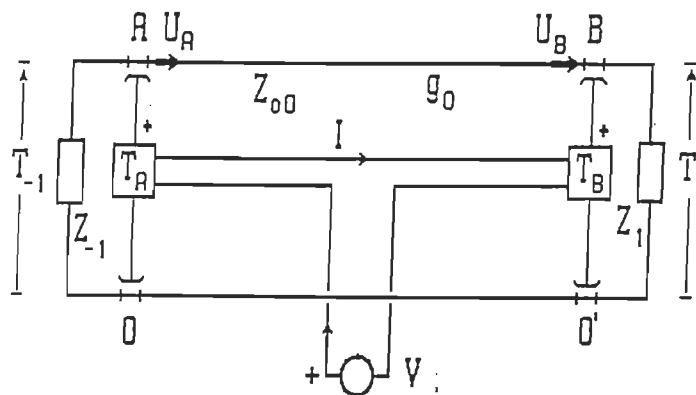


Figure 5 Modèle de transducteur piézoélectrique interface électro-acoustique [6]

2. RELATIONS ET EXPRESSIONS MATHÉMATIQUES

2.1 Développement du modèle

Considérons l'élément piézoélectrique schématisé à la figure 1, donc le modèle est la figure 5 [6]. Il est polarisé dans la direction Z^* (* direction 3 des piézocéramiques), de sorte que le champ électrique E résultant de la tension alternative appliquée V produit essentiellement des contraintes selon Z . Ses dimensions transversales sont très supérieures à son épaisseur a_0 , de sorte que le déplacement n'a qu'une composante selon Z . Les faces A et B sont en contact avec des milieux de propagation qui présentent des impédances acoustiques Z_A et Z_B à une fréquence donnée. On doit ici trouver une relation entre l'excitation électrique et les vitesses acoustiques des faces. On cherche particulièrement une expression de l'impédance électrique présentée par l'élément piézoélectrique [1].

Dans ce milieu, les équations piézoélectriques suivantes s'appliquent particulièrement, en notation tensorielle abrégée :

$$T_3 = C_{33} S_3 - h_{33} D_3 \quad \dots \dots \dots (29)$$

$$E_3 = -h_{33} S_3 + \beta_{33}^s D_3 \quad \dots \dots \dots (30)$$

Où h_{33} est une constante piézoélectrique de contrainte (en Newton/Coulomb), E_3 et D_3 sont les composantes respectives du champ électrique et de l'induction électrique dans la direction 3, β_{33}^s est la permittivité électrique inverse à déformation constante.

Vu que le déplacement est en une dimension, on peut éliminer les indices :

$$T = CS - hD \quad \dots \dots \dots (31)$$

$$E = -hS + D/\epsilon^s \quad \dots \dots \dots (32)$$

Il faut ici noter que le champ D est constant entre les électrodes, vu qu'il n'y a pas d'accumulation de charges dans le piézoélectrique et qu'on fait l'hypothèse que sa conductivité est nulle.

Si $b(z, t)$ est le déplacement d'une particule par rapport à sa position d'équilibre, la déformation relative S est, vu que b est fonction de Z et de t :

$$S = \frac{\partial b}{\partial z} \dots\dots\dots (33)$$



Comme on l'a vu plus haut, une tranche d'épaisseur δz déplacée de b subit une déformation δb , ce qui définit aussi S .

Dans les équations (31 et 32), T , S et D sont fonctions des variables z et t . On sait qu'en régime harmonique, vu l'annulation dans les deux membres du terme $\exp(j\omega t)$, ces trois symboles désignent des amplitudes complexes.

D'autre part, l'état de déplacement du milieu peut être décrit par la superposition de deux ondes se déplaçant en sens opposés [1] :

$$b(z, t) = B_+ \exp(-gz + j\omega t) + B_- \exp(+gz + j\omega t) \dots\dots\dots (34)$$

$$= [(B_+ \exp(-gz) + B_- \exp(+gz))] \exp(j\omega t) \dots\dots\dots (35)$$

$$= B(z) \exp(j\omega t) \dots\dots\dots (36)$$

On en tire :

$$\frac{\partial b}{\partial z} = -g B_+ \exp(-gz + j\omega t) + g B_- \exp(+gz + j\omega t) \dots\dots\dots (37)$$

$$= [-g B_+ \exp(-gz) + g B_- \exp(+gz)] \exp(j\omega t) \dots\dots\dots (38)$$

$$= \frac{dB(z)}{dz} \exp(j\omega t) = S(z) \exp(j\omega t) \dots\dots\dots (39)$$

$$\text{Ainsi, } S(z) = -g B_+ \exp(-gz) + g B_- \exp(gz) \dots \dots \dots (40)$$

est l'amplitude complexe de la déformation relative. Les déformations sur les faces A et B sont alors :

$$S_A(z) = -g B_+ \exp(-g z_A) + g B_- \exp(+g z_A) \dots \dots \dots (41)$$

$$S_B(z) = -g B_+ \exp(-g z_B) + g B_- \exp(+g z_B) \dots \dots \dots (42)$$

La vitesse acoustique est donnée par :

$$U(z, t) = \frac{\partial b}{\partial t} = j\omega B(z) \exp(j\omega t) = U(z) \exp(j\omega t) \dots \dots \dots (43)$$

De sorte que $U(z)$ est l'amplitude complexe de la vitesse acoustique :

$$U(z) = j\omega B(z) \dots \dots \dots (44)$$

Les amplitudes de vitesses acoustiques en A et B sont donc :

$$U_A = U_+ \exp(-g z_A) + U_- \exp(+g z_A) \dots \dots \dots (45)$$

$$U_B = U_+ \exp(-g z_B) + U_- \exp(+g z_B) \dots \dots \dots (46)$$

On obtient des expressions des constantes U_+ et U_- en résolvant ces dernières équations, notant que $z_B - z_A = a$ [1] :

$$U_+ = \frac{U_1 \exp(+g z_B) - U_2 \exp(+g z_A)}{2 \sin h(ga)} \dots \dots \dots (47)$$

et

$$U_- = \frac{U_2 \exp(-g z_A) - U_1 \exp(-g z_B)}{2 \sin h(ga)} \dots \dots \dots (48)$$

D'après (31) et (41, 42), les contraintes sur les faces sont donc :

$$T_A = cg [-B_+ \exp(-g z_A) + B_- \exp(+g z_A)] - hD \dots \dots \dots (49)$$

$$T_B = cg [-B_+ \exp(-g z_B) + B_- \exp(+g z_B)] - hD \dots \dots \dots (50)$$

Où

$g = \alpha + j\beta$; α : est le coefficient d'atténuation ou d'affaiblissement. Son unité est néper/mètre (Np.m^{-1})

g : est la fonction de propagation complexe (on peut écrire aussi $\gamma = \alpha + j\beta$).

β : est la constante de phase du milieu idéal sans perte. Son unité est le radian/mètre (rd.m^{-1}). Expression de β ($\beta = \frac{W}{V_o}$, $W = 2\pi \cdot fr$).

et

$$c = c_1 + jc_2$$

À toutes fins pratiques, pour la plupart des matériaux, la partie réelle c_1 de c est indépendante de la fréquence. Toutefois, au voisinage de fréquences de relaxation dans certaines substances, c_1 varie plus ou moins avec la fréquence [1]. Ceci se traduit par une légère augmentation de la vitesse de phase du son avec la fréquence. On peut définir une relaxation comme une résonance structurelle ou parfois moléculaire du milieu de propagation.

Pour sa part, c_2 varie assez considérablement avec la fréquence de l'onde acoustique. La mesure du coefficient d'atténuation α peut nous en fournir des valeurs. Pour la plupart des matériaux, le facteur α varie selon une loi de puissance sur une plage étendue de fréquences. On peut poser :

$$\alpha = K_r' (f/fr)^N$$

Où K_r' est une valeur d'atténuation à une fréquence de référence choisie fr . L'exposant N est déterminé par ajustement des valeurs : dans les solides, il est généralement compris entre 1.2 et 2 dans les fluides, il est voisin de 2. Dans chaque cas,

cela s'applique à des fréquences éloignées des relaxations du milieu. En général, c_2 est très inférieur à c_1 [1] et on obtient :

$$\alpha = \beta \frac{c_2}{2c_1} = \frac{Wc_2}{(2c_1V_o)}$$

Où V_o est la vitesse de phase des ondes acoustiques à champ D constant aussi appelée V^0 . Comme $W = 2\pi f$, on obtient :

$$c_2 = \frac{c_1 V_o}{\pi f} \cdot \alpha$$

Or, d'après (44), on peut remplacer les amplitudes de déplacement par celles de vitesse acoustique [1].

$$T_A = (cg/jw) [-U_+ \exp(-g z_A) + U_- \exp(+g z_A)] - hD \dots\dots\dots (51)$$

$$T_B = (cg/jw) [-U_+ \exp(-g z_B) + U_- \exp(+g z_B)] - hD \dots\dots\dots (52)$$

En substituant les équations (47 et 48) dans ces dernières, on obtiendra après réarrangement, des expressions des contraintes en fonction des vitesses sur les faces :

$$T_A = -\frac{Z_o U_A}{\tanh(ga)} + \frac{Z_o U_B}{\sinh(ga)} - hD \dots\dots\dots (53)$$

et

$$T_B = -\frac{Z_o U_A}{\sinh(ga)} - \frac{Z_o U_B}{\tanh(ga)} - hD \dots\dots\dots (54)$$

Où $Z_o = cg/jw$ est l'impédance caractéristique complexe du milieu.

D'autre part, la relation (32) va fournir une expression de la tension appliquée en fonction du courant et des vitesses acoustiques sur les faces. En effet (1) :

$$V = V_B - V_A = \int_B^A Edz = -h(B_B - B_A) + (D/\epsilon^s)(z_B - z_A), \text{ d'où } z_B - z_A = a$$

$$V = -\frac{h}{jw}(U_B - U_A) + (D/\epsilon^s)a \dots\dots\dots (55)$$

Or, en vertu du théorème de Gauss, D est égal à la densité de charge sur les électrodes :

$D = Q/A$. Comme la charge est l'intégrale du courant, elle est donc donnée en régime harmonique par $Q = I/j\omega$ et $D = I/(j\omega A)$. De plus, la capacité électrique de l'élément étant $C_o = \epsilon^s A/a$ où A : surface, ϵ : permittivité électrique, a : épaisseur.

Donc les trois équations précédentes donnent :

$$T_A = -\frac{Z_o U_A}{\tanh(ga)} + \frac{Z_o U_B}{\sinh(ga)} - \frac{hI}{j\omega A} \dots\dots\dots (56)$$

$$T_B = -\frac{Z_o U_A}{\sinh(ga)} + \frac{Z_o U_B}{\tanh(ga)} - \frac{hI}{j\omega A} \dots\dots\dots (57)$$

$$V = \frac{hU_A}{j\omega} - \frac{hU_B}{j\omega} + \frac{I}{j\omega C_o} \dots\dots\dots (58)$$

Les trois équations peuvent s'écrire sous la forme matricielle [1, 13] :

$$\begin{bmatrix} T_A \\ T_B \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_1 & F_2 & -h/j\omega A \\ -F_2 & F_1 & -h/j\omega A \\ h/j\omega & -h/j\omega & 1/j\omega C_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ I \end{bmatrix} \dots\dots\dots (59)$$

Où

$$F_1 = \frac{Z_o}{\tanh(ga)} \text{ et } F_2 = \frac{Z_o}{\sinh(ga)}$$

On peut maintenant modifier les équations (56 et 57) pour faire apparaître les impédances acoustiques Z_g et Z_d des milieux adjacents. En effet, par définition de l'impédance acoustique d'un milieu, on a :

$$P_A = -T_A = -Z_g U_A \dots\dots\dots (60)$$

$$P_B = -T_B = +Z_d U_B \dots\dots\dots (61)$$

Donc, en substituant, on obtient :

$$Z_g U_A = \frac{Z_o U_A}{\tanh(ga)} + \frac{Z_o U_B}{\sinh(ga)} - \frac{hl}{j\omega A} \dots\dots\dots (62)$$

et

$$Z_d U_B = \frac{Z_o - U_A}{\sinh(ga)} + \frac{Z_o U_B}{\tanh(ga)} - \frac{hl}{j\omega A} \dots\dots\dots (63)$$

Donc, si $K = h/j\omega A$, où h : cte piézoélectrique

A : surface du piézoélectrique

Alors :

$$(F_1 + Z_g) U_A - F_2 U_B = -Kl \dots\dots\dots (64)$$

$$F_2 U_A - (F_1 + Z_d) U_B = -Kl \dots\dots\dots (65)$$

On doit résoudre le système :

$$U_A = \frac{-Kl + F_2 U_B}{F_1 + Z_g} \dots\dots\dots (65')$$

L'expression précédente de U_A est fonction de U_B donc, en utilisant l'expression

(65);

$$F_2 \frac{-Kl + F_2 U_B}{F_1 + Z_g} - F_1 + Z_d U_B = -Kl \dots\dots\dots (65'')$$

On obtient :

$$U_A = \frac{(F_1 - F_2 + Z_d)}{F_2^2 - F_1^2 - Z_g Z_d - F_1 (Z_g + Z_d)} \cdot K I = G_1 I \dots\dots\dots (66)$$

$$U_B = \frac{F_2 - F_1 - Z_g}{F_2^2 - F_1^2 - Z_g Z_d - F_1 (Z_g + Z_d)} \cdot K I = G_2 I \dots\dots\dots (67)$$

En portant ces dernières expressions dans (56, 57 et 58), on tire V en fonction de

I d'où une expression de l'impédance électrique :

$Z_E = V/I$ du transducteur piézoélectrique

$$Z_E = A \cdot K^2 \cdot \frac{Z_g + Z_d - 2(F_2 - F_1)}{F_2^2 - F_1^2 - Z_g Z_d - F_1 (Z_g + Z_d)} + \frac{1}{j\omega C_o} \dots\dots\dots (68)$$

où

Z_g : impédance acoustique vue à gauche du piézoélectrique

Z_d : impédance acoustique vue à droite du piézoélectrique

Finalement, vu que $I = V/Z_E$, on obtient les expressions de la vitesse acoustique sur chaque face (1) :

$$U_A = \frac{G_1}{Z_E} \cdot V \dots\dots\dots (69)$$

$$U_B = \frac{G_2}{Z_E} \cdot V \dots\dots\dots (70)$$

2.2 Algorithme de calcul

2.2.1 Algorithme de calcul pour un élément piézoélectrique

Dans la pratique, on colle souvent une ou plusieurs couches solides sur l'une ou les deux faces du piézoélectrique, particulièrement si l'on recherche un transfert plus efficace de l'énergie entre le milieu de propagation et le piézoélectrique dans une bande de fréquence plus étendue [1]. Un système typique est représenté pour la figure suivante :

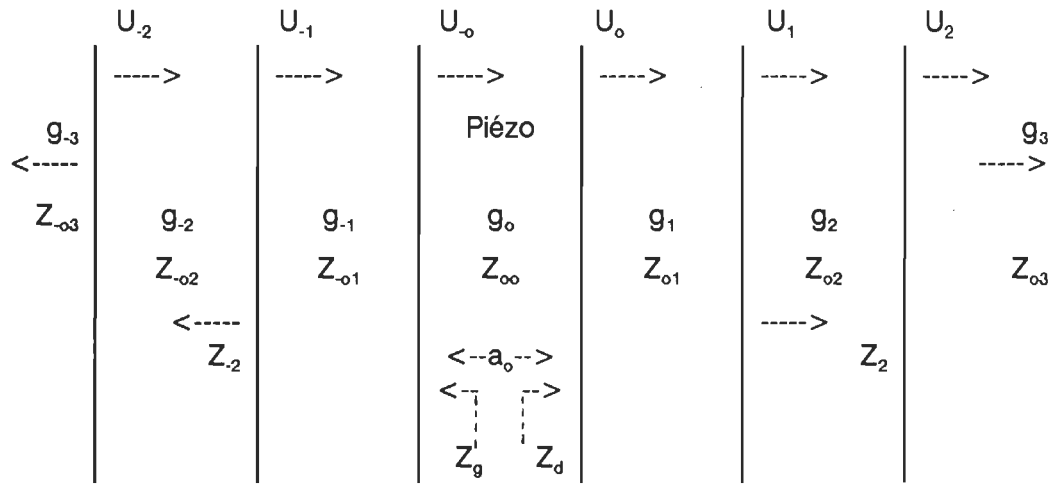


Figure 6 Transducteur composé

On peut utiliser certaines formules de la théorie des lignes électriques pour calculer l'impédance électrique du transducteur et les vitesses acoustiques aux diverses interfaces.

Pour calculer l'impédance électrique et la vitesse acoustique des faces du piézoélectrique, il faut connaître les impédances acoustiques Z_g et Z_d présentées par les milieux à gauche et à droite respectivement.

Celles-ci se calculent au moyen de la formule qui donne l'impédance d'entrée d'une ligne en fonction de ses caractéristiques et de l'impédance en bout de ligne.

Donc, dans le cas de la figure 6 :

$$Z_d = \frac{Z_2 + Z_{o1} \tanh(g_1 a_1)}{Z_{o1} + Z_2 \tanh(g_1 a_1)} Z_{o1} \dots \dots \dots (71)$$

où

$$Z_2 = \frac{Z_3 + Z_{o2} \tanh(g_2 a_2)}{Z_{o2} + Z_3 \tanh(g_2 a_2)} Z_{o2} \dots \dots \dots (72)$$

et

$$Z_g = \frac{Z_{-2} + Z_{o1} \tanh(g_{-1} a_1)}{Z_{o1} + Z_{-2} \tanh(g_{-1} a_1)} Z_{o1} \dots \dots \dots (73)$$

où

$$Z_{-2} = \frac{Z_3 + Z_{-02} \tanh(g_{-2} a_{-2})}{Z_{-02} + Z_3 \tanh(g_{-2} a_{-2})} Z_{-02} \dots\dots\dots (74)$$

Avec Z_d et Z_g , on utilise l'expression (68) pour calculer l'impédance électrique.

Connaissant les impédances acoustiques, on peut calculer les vitesses acoustiques aux interfaces.

En adaptant, on obtient les expressions suivantes :

$$U_1 = [Z_{-01} \cosh(g_1 a_1) + Z_2 \sinh(g_1 a_1)] U_2 / Z_{-01} \dots\dots\dots (75)$$

où

$$U_2 = [Z_{-02} \cosh(g_2 a_2) + Z_3 \sinh(g_2 a_2)] U_3 / Z_{-02} \dots\dots\dots (76)$$

De même :

$$U_{-1} = [Z_{-01} \cosh(g_{-1} a_{-1}) + Z_{-2} \sinh(g_{-1} a_{-1})] U_{-2} / Z_{-01} \dots\dots\dots (77)$$

où

$$U_{-2} = [Z_{-02} \cosh(g_{-2} a_{-2}) + Z_{-3} \sinh(g_{-2} a_{-2})] U_{-3} / Z_{-02} \dots\dots\dots (78)$$

etc.

2.2.2 Algorithme pour deux éléments piézoélectriques

Un système simple est formé de deux éléments piézoélectriques pouvant vibrer en épaisseur qui sont collés ensemble comme dans la figure 8, mis électriquement en parallèle avec leurs polarisations P_1 et P_2 en opposition. On peut en faire le modèle de la figure 9.

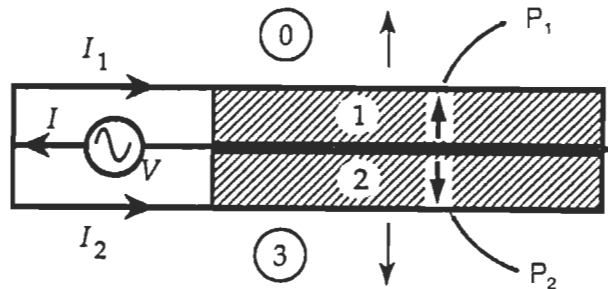


Figure 7 Transducteur composé de deux éléments piézoélectriques électriquement en parallèle et mécaniquement en série

Donc, dans l'algorithme de calcul, on doit le développer de la façon suivante [Document de travail de M. Dion, octobre 1992] :

On peut appliquer le théorème de superposition pour calculer les vitesses acoustiques sur les faces du transducteur.

1. L'élément piézoélectrique 1 est supposé actif, (relié à une source de tension V) et l'élément piézoélectrique 2 est supposé passif (relié à une source nulle, $V = 0$). La vitesse de propagation dans 2 est alors V^E .

2. On calcule les vitesses acoustiques quand l'élément piézoélectrique 1 est actif.

Donc, on trouve : U'_{1A} , U'_{1B} , U'_{2A} , U'_{2B}

3. De la même façon, avec 1 passif et 2 actif, on calcule les vitesses acoustiques :

U''_{1A} , U''_{1B} , U''_{2A} , U''_{2B}

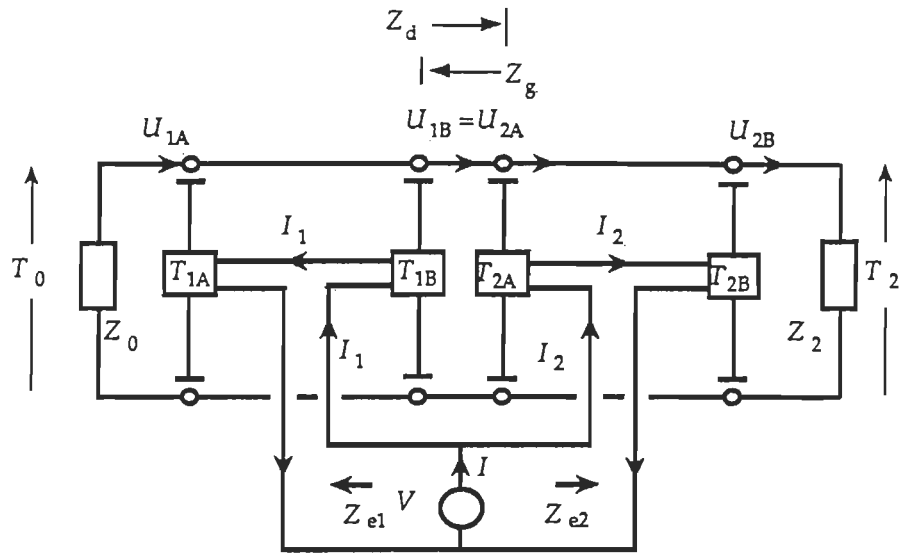


Figure 8 Modèle d'un transducteur formé de deux éléments piézoélectriques
[Document de travail de M. Dion, octobre 1992]

Alors, les vitesses acoustiques de faces sont :

$$U_{1A} = U'_{1A} + U''_{1A} \dots \dots \dots (79)$$

$$U_{1B} = U'_{1B} + U''_{1B} \dots \dots \dots (80)$$

$$U_{2A} = U'_{2A} + U''_{2A} \dots \dots \dots (81)$$

$$U_{2B} = U'_{2B} + U''_{2B} \dots \dots \dots (82)$$

Pour le premier élément piézoélectrique, les vitesses acoustiques, la tension et le courant électrique sont reliés par le système d'équation suivant [1, 13] :

$$\begin{bmatrix} T_{1A} \\ T_{1B} \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{1A} & F_{1B} & -h/j\omega A \\ -F_{1B} & F_{1A} & -h/j\omega A \\ h/j\omega & -h/j\omega & 1/j\omega C_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ I_1 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (83)$$

Donc :

$$Z_{e1} = \frac{V}{I_1}, \quad V = V_s - Z_s I_1$$

V : Tension de la source; $V = V_s$ car $Z_s = \emptyset$

Où :

$$I_1 = j\omega C_o \cdot [V - \frac{h(U_{1A} - U_{1B})}{j\omega}] \dots\dots\dots (84)$$

Avec Z_d , l'impédance acoustique vue par l'élément piézoélectrique 1 à droite. Dans le calcul de Z_d , l'élément piézoélectrique 2 est court-circuité, ce qui fait que la vitesse de propagation est V^E .

Pour le deuxième élément piézoélectrique actif, on a le suivant :

$$\begin{bmatrix} T_{2A} \\ T_{2B} \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -F_{2A} & F_{2B} & -h/j\omega A \\ -F_{2B} & F_{2A} & -h/j\omega A \\ h/j\omega & -h/j\omega & 1/j\omega C_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{2A} \\ U_{2B} \\ I_2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (85)$$

Donc :

$$Z_{e2} = \frac{V}{I_2} \dots\dots\dots (86)$$

Où :

$$I_2 = j\omega C_o [V - \frac{h}{j\omega} (U_{2A} - U_{2B})] \dots\dots\dots (87)$$

Avec Z_g , l'impédance acoustique vue par l'élément piézoélectrique 2 à gauche. Dans le calcul de Z_g l'élément piézoélectrique 1 est court-circuité, ce qui fait que la vitesse de propagation est V^E .

L'impédance électrique présentée par le transducteur à la source V est :

$$Z_e = \frac{Z_{e1} Z_{e2}}{Z_{e1} + Z_{e2}} \dots\dots\dots (88)$$

où

$$Z_{e1} = \frac{V}{I_1} \quad \text{et} \quad Z_{e2} = \frac{V}{I_2}$$

Alors :

$$Z_e = \frac{V}{I_1 + I_2} \dots\dots\dots (89)$$

- Il faut noter que les impédances Z_{e1} et Z_{e2} sont différentes de celles utilisées pour le calcul des vitesses acoustiques.
- L'impédance interne de la source doit être nulle afin de pouvoir appliquer le théorème de superposition.

2.2.3. Algorithme de calcul pour trois et quatre éléments piézoélectriques qui constituent un résonateur ultrasonore

On peut généraliser la méthode précédente en utilisant l'expression pour chaque élément piézoélectrique. La figure 9 est le modèle d'un résonateur ultrasonore, composé par deux transducteurs, 1 et 2 [Document de travail de M. Dion, janvier 1992] d'où U_7 , U_8 sont les vitesses à chaque interface, Z_o est l'impédance acoustique de chaque milieu, T est la contrainte γ est en fonction de propagation complexe et V tension électrique.

Alors que Z_{e1} représente l'impédance électrique pour le premier transducteur actif et le deuxième passif.

Donc:

$$Z_{e1} = \frac{V}{I_1 + I_2} \dots\dots\dots (90)$$

et Z_{e2} représente l'impédance électrique pour le deuxième transducteur actif et le premier passif.

Alors que :

$$Z_{e2} = \frac{V}{I_3 + I_4} \dots\dots\dots (91)$$

L'impédance électrique du résonateur est:

$$Z_R = \frac{Z_{e1} Z_{e2}}{Z_{e1} + Z_{e2}} = \frac{V}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \dots \dots \dots (92)$$

Si nous avons un résonateur à trois éléments piézoélectriques, l'impédance électrique est :

$$Z_R = \frac{V}{I_1 + I_2 + I_3} \dots \dots \dots (93)$$

Remarques : Définitions de la vitesse V^D et la vitesse V^E .

La vitesse V^D est la vitesse de phase des ondes acoustiques à champ D constant.

La vitesse V^E est la vitesse de phase des ondes acoustiques à champ E constant.

Remarques : La figure 8 est un circuit de ligne électrique du modèle d'un transducteur formé de deux éléments piézoélectrique, où il y a les vitesses U_{1A} , U_{1B} , U_{2A} et U_{2B} de chaque élément piézoélectrique.

T_{1A} , T_{1B} et T_{2A} , T_{2B} sont les contraintes de chaque éléments piézoélectrique. Z_d , Z_g sont les impédances vues à droite et à gauche de chaque élément piézoélectrique. Z_{e1} , Z_{e2} sont les impédances d'entrées à chaque élément piézoélectrique. I_1 , I_2 sont les courants de chaque élément piézoélectrique. T_o , T_2 sont les contraintes des impédances Z_o et Z_2 .

La figure 9 est un circuit de ligne électrique du modèle d'un résonateur composé par deux transducteurs piézoélectriques face à face, au milieu un liquide. La variable U représente les vitesses aux diverses interphases, la variable Z est l'impédance acoustique de chaque milieu, la variable T la contrainte, γ en la fonction de propagation complexe.

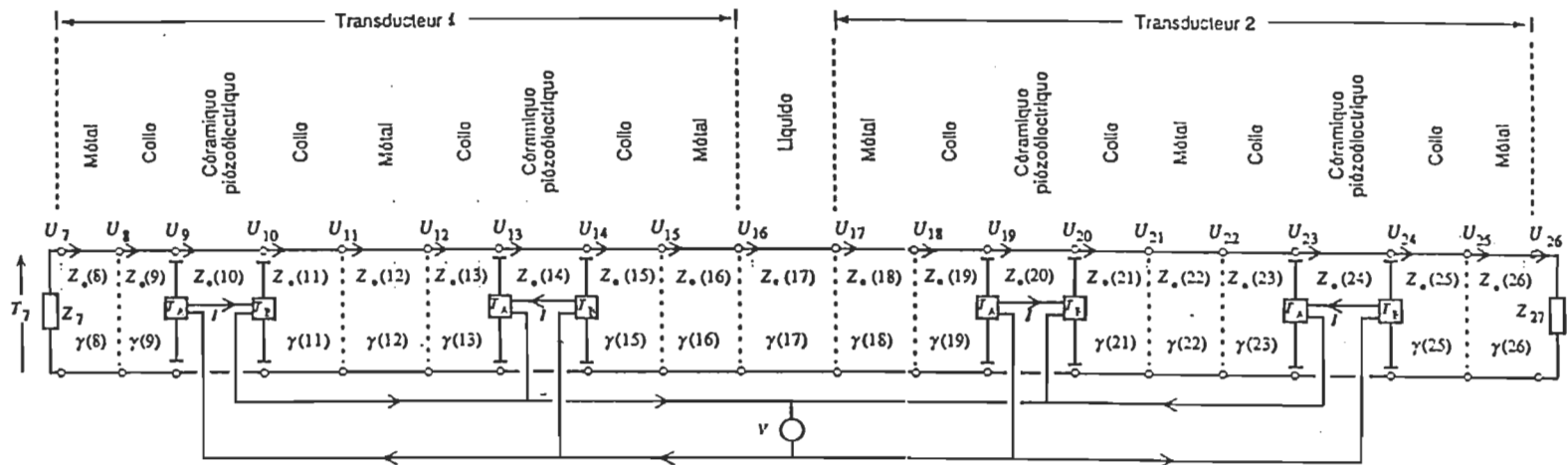


Figure 9 Modèle de résonateur ultrasonore - Caractérisation acousto-optique des pâtes à papier [Document de travail de M. Dion, janvier 1992).

3. STRUCTURE DU PROGRAMME

Matlab est un logiciel pour traiter des problèmes de façon générale, il est très efficace pour faire des opérations avec matrices et nombres complexes ainsi qu'un nombre d'applications mathématiques. Les différentes fonctions mathématiques sont des fichiers.m mais on peut aussi faire la programmation de fichiers.m pour traiter un problème particulier. Nous avons fait la programmation de quatre boucles pour traiter le problème du résonateur car si nous avons un résonateur à un élément piézoélectrique, la simulation avec le programme à quatre éléments piézoélectriques constituant un résonateur sera plus long que si on utilise la boucle pour simuler un élément piézoélectrique.

3.1 Diagramme du programme principal

La façon d'utiliser le programme pour étudier un résonateur est la suivante:

Premièrement on doit activer l'ordinateur pour demander le logiciel Matlab.

CD MATLAB
MATLAB / ATMATLAB

Ensuite on peut taper "these" qui nous présente 4 options. Voir diagramme : **structure du programme.**

» these

1. Boucle d'un élément piézoélectrique
2. Boucle de deux éléments piézoélectriques
3. Boucle de trois éléments piézoélectriques
4. Boucle de quatre éléments piézoélectriques

On doit choisir en fonction du problème à étudier la boucle (1, 2, 3, ou 4).

Deuxièmement le programme présente plusieurs fichiers de données à étudier. Si on doit créer un nouveau fichier de données, on peut utiliser généralement l'éditeur de texte QED. Une autre possibilité est de créer un nouveau fichier en utilisant un fichier existant, seulement il faut changer le nom sans effacer le fichier précédent.

» !qed nom de fichier . m

L'ordinateur présente le fichier, si le fichier à étudier est de la même caractéristique ou structure du problème, on peut changer le nom sans effacer le fichier ancien, ensuite on peut changer les données en demandant le nouveau fichier.

» F3

» C

» Nouveau nom de fichier . m

» !qed

» Nouveau nom de fichier . m

On peut maintenant changer les données et enregistrer les données de la manière suivante:

» F3

» E

Troisièmement, on peut lancer la simulation avec le nouveau fichier.

» nom de fichier.

DIAGRAMME - STRUCTURE DU PROGRAMME

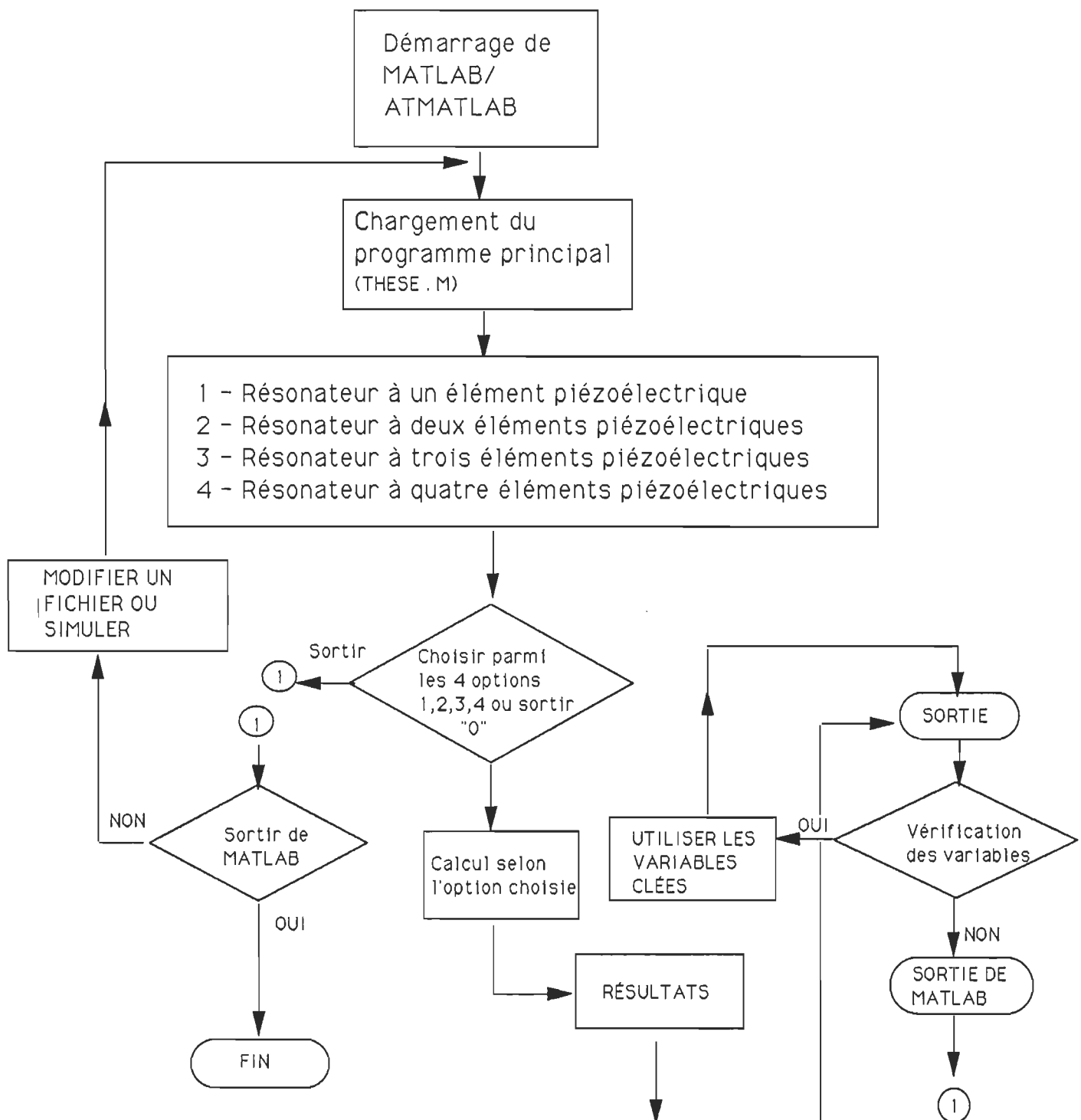


Figure 10 - Structure du programme

3.2 Variables pour chaque boucle

3.2.1 Boucle d'un élément piézoélectrique

Toutes les variables clés sont définies de la façon suivante :

Variables utilisées pour l'élément piézoélectrique :

Z_{1o} = impédance caractéristique (R)
 a_p = épaisseur (m)
 A = surface (m^2)
 C_o = capacité électrique (F)
 h = constante piézoélectrique (N/C)
 w = vitesse (m/s)
 f_r = fréquence de référence (Hz)
 K_{rr} = atténuation (Np/m)
 N_n = exposant
 f_i = fréquence inférieure (Hz)
 f_s = fréquence supérieure (Hz)
 n_i = nombre d'intervalles
 Z_{A1} = impédance caractéristique du milieu à gauche (R)
 Z_1 = impédance caractéristique du milieu à droite (R)
 i = nombre de milieux à droite
 ia = nombre de milieux à gauche

Variables utilisées pour les couches à gauche de l'élément piézoélectrique :

$Z_{ao}(n)$ = impédance caractéristique (R)
 $a_a(n)$ = épaisseur (m)
 $v_a(n)$ = vitesse (m/s)
 $K_{ra}(n)$ = atténuation (Np/m)
 $N_{ap}(n)$ = exposant

Variables utilisées pour les couches à droite de l'élément piézoélectrique :

$Z_o(k)$ = impédance caractéristique (R)
 $a(k)$ = épaisseur (m)
 $v(k)$ = vitesse (m/s)
 $K_r(k)$ = atténuation (Np/m)
 $N_p(k)$ = exposant

Remarques:

Pour les couches à gauche la valeur de n varie de la façon suivante:

$$n = ia, ia-1, ia-2, \dots, 1$$

si $ia = 2$

$n = 2$ correspond à la couche 8

$n = 1$ correspond à la couche 9

Pour les couches à droite la valeur de k varie de la façon suivante:

$$k = 1, 2, 3, \dots, i$$

si $i = 2$

$k = 1$ correspond à la couche 12

$k = 2$ correspond à la couche 11

La couche 10 est l'élément piézoélectrique.

Variables de sortie :

$ZZ =$ impédance électrique du piézoélectrique

$XA =$ argument de l'impédance électrique en degrés

$V9 =$ module de la vitesse $V9$

$V10 =$ module de la vitesse $V10$

.

.

.

.

$Vn =$ module de la vitesse n

$Va2 =$ module de la vitesse $V11$

$Va3 =$ module de la vitesse $V12$

.

.

.

.

$Van =$ module de la vitesse correspondante $U(10+n-1)$

3.2.2 Boucle de deux éléments piézoélectriques

Variables utilisées pour l'élément piézoélectrique :

Piézoélectrique 1

Z10	=	impédance caractéristique (R)
ap	=	épaisseur (m)
A	=	surface (m ²)
C _o	=	capacité électrique (F)
h	=	constante piézoélectrique (N/C)
vv	=	vitesse (m/s)
fr	=	fréquence de référence (Hz)
Krr	=	atténuation (Np/m)
Nn	=	exposant
fi	=	fréquence inférieure (Hz)
fs	=	fréquence supérieure (Hz)
ni	=	nombre d'intervalles

Piézoélectrique 2

ZP2	=	impédance caractéristique (R)
ap2	=	épaisseur (m)
A2	=	surface (m ²)
C _o 2	=	capacité électrique (F)
h2	=	constante piézoélectrique (N/C)
V2	=	vitesse (m/s)
fr2	=	fréquence de référence (Hz)
Kr2	=	atténuation (Np/m)
N2	=	exposant

Variables pour le nombre de couches à gauche et à droite :

ia	=	nombre de couches à gauche
id	=	nombre de couches à droite

Variables pour les couches à gauche :

Zao(n)	=	impédance caractéristique (R)
aa(n)	=	épaisseur (m)
va(n)	=	vitesse (m/s)
Kra(n)	=	atténuation (Np/m)
Nap(n)	=	exposant

Variables pour les couches à droite :

$Z_0(k)$ = impédance caractéristique (R)
 $a(k)$ = épaisseur (m)
 $v(k)$ = vitesse (m/s)
 $Kr(k)$ = atténuation (Np/m)
 $Np(k)$ = exposant

Remarques :

Pour les couches à gauche la valeur de n varie de la façon suivante :

$n = ia, ia-1, ia-2, \dots, 1$

si $ia = 2$

$n = 2$ correspond à la couche 8

$n = 1$ correspond à la couche 9

Pour les couches à droite la valeur de k varie de la façon suivante :

$k = 1, 2, 3, \dots, i$

si $i = 2$

$k = 1$ correspond à la couche 12

$k = 2$ correspond à la couche 11

Les couche 10 et 14 sont les éléments piézoélectriques.

Variables de sortie :

$ZZe1$ = module impédance électrique du Piézo 1
 $ZZe2$ = module impédance électrique du Piézo 2
 ZRT = module impédance électrique du transducteur
 XA = argument de l'impédance électrique
 $U7$ = module de la vitesse $U7$
 $U8$ = module de la vitesse $U7$
 .
 .
 .
 .
 U_n = module de la vitesse U_n ($n \leq N_D$)
 N_D = nombre de couches à droite

3.2.3 Boucle de trois et quatre éléments piézoélectriques

Variables utilisées pour l'élément piézoélectriques :

Piézoélectrique 1

ZP1 = impédance caractéristique (R)
 ap = épaisseur (m)
 A = surface (m²)
 C_o = capacité électrique (F)
 h = constante piézoélectrique (N/C)
 vt = vitesse (m/s)
 fr = fréquence de référence (Hz)
 Krr = atténuation (Np/m)
 Nn = exposant
 fi = fréquence inférieure (Hz)
 fs = fréquence supérieure (Hz)
 ni = nombre d'intervalles

Piézoélectrique 2

ZP2 = impédance caractéristique (R)
 ap2 = épaisseur (m)
 A2 = surface (m²)
 C_{o2} = capacité électrique
 h2 = constante piézoélectrique (N/C)
 vr = vitesse (m/s)
 fr2 = fréquence de référence (Hz)
 Kr12 = atténuation (Np/m)
 N2 = exposant

Piézoélectrique 3

ZP3 = impédance caractéristique (R)
 ap3 = épaisseur (m)
 A3 = surface (m²)
 C_{o3} = capacité électrique (F)
 h3 = constante piézoélectrique (N/C)
 vh = vitesse (m/s)
 fr3 = fréquence de référence (Hz)
 Kr13 = atténuation (Np/m)
 N3 = exposant

Piézoélectrique 4

$ZP4$ = impédance caractéristique (R)
 $ap4$ = épaisseur (m)
 $A4$ = surface (m^2)
 C_{o4} = capacité électrique (N/C)
 $h4$ = constante piézoélectrique
 vk = vitesse (m/s)
 $fr4$ = fréquence de référence (Hz)
 $Kr14$ = atténuation (Np/m)
 $N4$ = exposant

Variables pour les couches à gauche :

$Zao(n)$ = impédance caractéristique (R)
 $aa(n)$ = épaisseur (m)
 $va(n)$ = vitesse (m/s)
 $Kra(n)$ = atténuation (Np/m)
 $Nap(n)$ = exposant

Variables pour les couches à droite :

$Zo2(k)$ = impédance caractéristique (R)
 $aa2(k)$ = épaisseur (mts)
 $vv2(k)$ = vitesse (m/s)
 $KKr2(k)$ = atténuation (Np/m)
 $Nd(k)$ = exposant

Remarques :

Pour les couches à gauche la valeur de n varie de la façon suivante :

$n = ia, ia-1, ia-2, \dots, 1$

si $ia = 2$

$n = 2$ correspond à la couche 8

$n = 1$ correspond à la couche 9

Pour les couches à droite la valeur de k varie de la façon suivante :

$k = 1, 2, 3, \dots, i$

si $i = 2$

$k = 1$ correspond à la couche 12

$k = 2$ correspond à la couche 11

Variables de sortie :

Ze1 = module impédance électrique transducteur 1
 Ze2 = module impédance électrique transducteur 2
 ZRT = module impédance électrique du résonateur
 ZZ1 = module impédance électrique piézo 1
 ZZ2 = module impédance électrique piézo 2
 ZZ3 = module impédance électrique piézo 3
 ZZ4 = module impédance électrique piézo 4
 ArgR = argument en degrés de l'impédance électrique du résonateur
 U7 = module de la vitesse acoustique U7
 U8 = module de la vitesse acoustique U8

.
 .
 .
 .

Un = module de la vitesse acoustique Un
 $n \leq N_p$
 Nd = nombre de couches à droite

3.3 Les options de résultats pour chaque boucle

3.3.1 Boucle d'un élément piézoélectrique

a.- Impédance électrique ou les vitesses acoustiques (1/0)=

"1" pour l'impédance électrique du piézo

"0" pour les vitesses

b.- MAX-MIN de l'impédance électrique (1/0)=

"1" pour avoir les max-min

"0" pour ne pas avoir les Max-Min

c.- Les vitesses acoustiques sur chaque face (1/0)

d.- Argument de l'impédance électrique (1/0)

e.- Variables [Z] [U10], [U9] (1/0)=

f.- Argument des variables [Z] [U10], [U9] (1/0)=

g.- Valeur de [Z], [U10], [U9]... par l'imprimante (1/0) =

h.- Valeur Max-Min par l'imprimante (1/0) =

Remarque : "1" pour oui, "0" pour non.

3.3.2 Boucle de deux éléments piézoélectriques

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
LABORATOIRE D'ULTRASONIQUE ET CAPTEURS
RÉSONATEUR ULTRASONORE: 2 PIÉZOS

RÉSULTATS GRAPHIQUES IMPÉDANCE ET VITESSES

- 1.- Impédance électrique piézo 1
- 2.- Impédance électrique piézo 2
- 3.- Impédance électrique résonateur
- 4.- Arg. impédance électrique résonateur
- 5.- Superposition graphiques impédances
- 6.- Vitesses acoustiques aux diverses int.
- 7.- Plusieurs graphiques sur l'écran
- 8.- Valeurs Max-Min des impédances

Choisir 1.....8 et "0" pour sortir =

3.3.3 Boucle de trois éléments piézoélectriques

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
LABORATOIRE D'ULTRASONIQUE ET CAPTEURS
RÉSONATEUR ULTRASONORE: 3 ÉLÉMENTS PIÉZOS

SOLUTION GRAPHIQUE POUR L'IMPÉDANCE ET VITESSES

- 1.- Impédance électrique piézo 1
- 2.- Impédance électrique piézo 2
- 3.- Impédance électrique piézo 3
- 4.- Impédance électrique résonateur
- 5.- Plusieurs graphiques sur l'écran de l'impédance
- 6.- Quelques graphiques de vitesses acoustiques
- 7.- Valeurs Max-Min imp. des transducteurs et résonateurs
- 8.- Vitesses acoustiques aux diverses interfaces

Choisir graphique (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,...), "0" sortir du programme =

3.3.4 Boucle de 4 éléments piézoélectriques

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
LABORATOIRE D'ULTRASONIQUE ET CAPTEURS
RÉSONATEUR ULTRASONORE: 4 PIÉZOS

SOLUTION POUR L'IMPÉDANCE ET VITESSES

- 1.- Impédance électrique piézo 1
- 2.- Impédance électrique piézo 2
- 3.- Impédance électrique piézo 3
- 4.- Impédance électrique piézo 4
- 5.- Impédance électrique transducteur 1
- 6.- Impédance électrique transducteur 2
- 7.- Impédance électrique résonateur
- 8.- Plusieurs graphiques sur l'écran
- 9.- Vitesse acoustique aux interfaces

Choisir graphique (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8,...), "0" sortir du programme =

3.4 Fonctions de l'éditeur du texte et de MatLab pour l'analyse des variables

Pour faire un fichier de données, il faut écrire le fichier avec un logiciel (éditeur du text). On utilise avec MatLab le logiciel !qed qui a les fonctions suivantes:

File Menu

File → tesis1.m

File Commands

- c Change output file name
 - d Directory listing
 - e Exit with saving
 - i Insert lines from another file
 - l List another file
 - p Print
 - q Quit without saving
 - r Return to editing
 - s Save and return to editing
- Enter Command Letter →

Pour analyser les variables en sortant du programme, on peut faire sortir tous les graphiques et toutes les données car MatLab garde toutes les données de la simulation.

- ▶ Si on veut une courbe d'une variable :
 - » semilogy (f, ZZ1) est l'impédance, ZZ1 et f la fréquence (la fonction semilogy, l'échelle y est logarithmique).
- ▶ Si on veut plusieurs courbes sur un même graphique :
 - » semilogy (f, ZZ1, f, ZZ2) est la superposition de deux courbes de variables ZZ1 et ZZ2.
- ▶ Si on veut les données de ZZ1 :
 - » ZZ1, on peut garder à l'écran toutes les données pour une plage de fréquence.
- ▶ Si on doit fixer les axes X et Y, on peut utiliser la fonction :
 - axis ([Xmin, Xmax, Ymax, Ymin])
- ▶ Si on doit écrire le titre et les commentaires d'un graphique, on utilise les fonctions suivantes :
 - » title ('commentaire')
 - » xlabel ('axe x')
 - » ylabel ('axe y')

Ex:

- » titre ('vitesse U9')
- » xlabel ('fréquence en Hz')
- » ylabel ('vitesse en m/s')

Si on veut imprimer un graphique, on utilise la fonction:

Print screen, on peut taper la clé

PRINT SCREEN

Remarques :

Il faut avant d'entrer à ATMATLAB, actionner le logiciel pour imprimer de la façon suivante:

```
C:\ CD MATLAB  
C:\ MATLAB \ EGAEPSON  
C:\ MATLAB \ ATMATLAB
```

Pour toutes les fonctions de MatLab, voir manuel, disponible au magasin d'électronique de l'U.Q.T.R.

3.5 Les différents algorithmes dans le programme principal

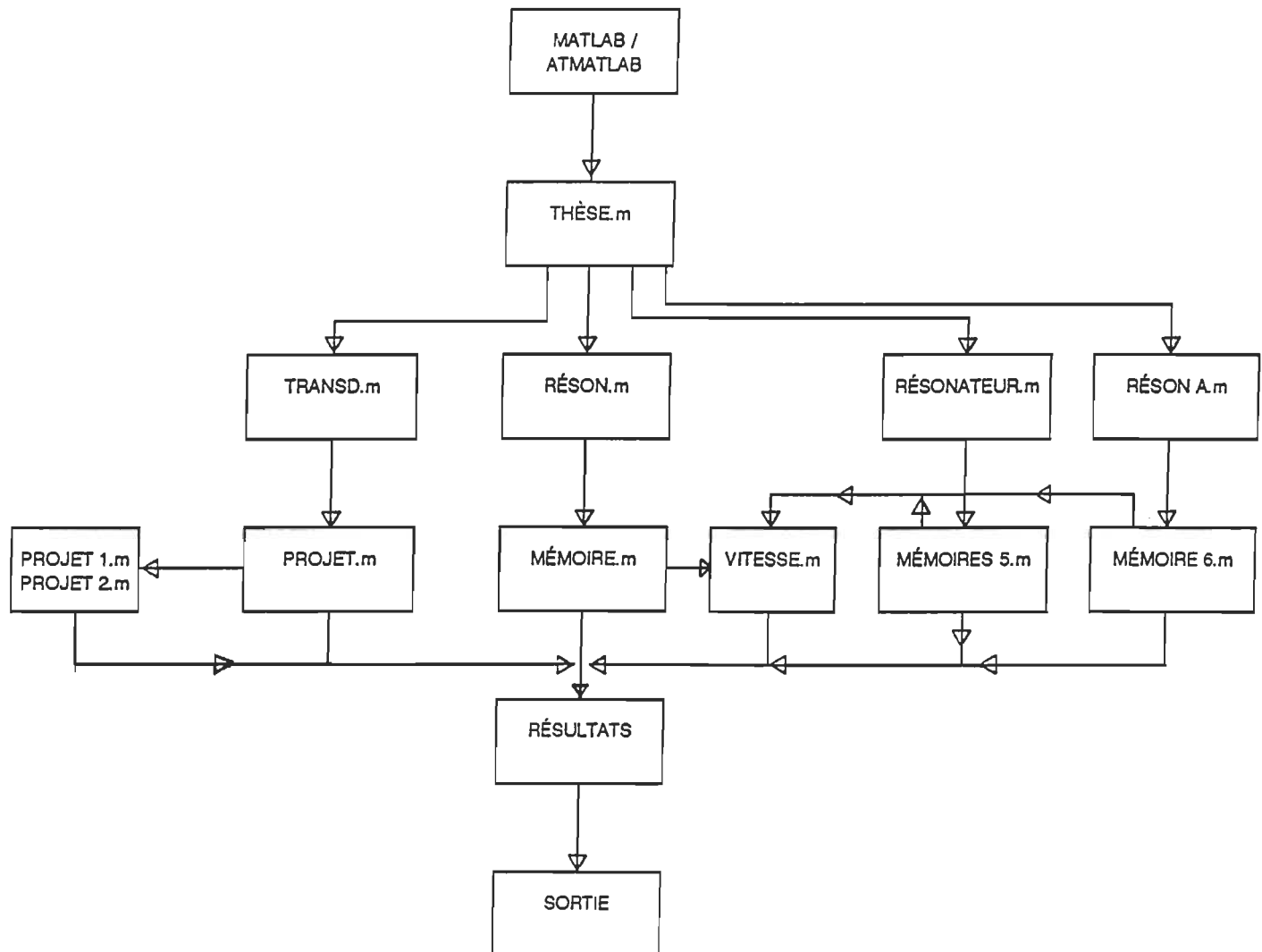


Figure 11

3.5.1 Description des différents algorithmes dans le programme principal

Dans la figure 11, le programme source est le logiciel MATLAB/ATMATLAB. On peut demander le programme thèse.m pour obtenir les différents programmes pour faire les différents simulations.

Le programme Transd.m a les différents fichiers de données pour faire la simulation d'un élément piézoélectrique.

Le programme Réson.m a les différents fichiers de données pour faire la simulation de deux éléments piézoélectrique.

Le programme Résonateur.m a les différents fichiers de données pour faire la simulation de trois éléments piézoélectriques.

Le programme Résona.m a les différents fichiers de données pour faire la simulation de quatre éléments piézoélectriques.

Les autres programmes, on va faire une brève description pour chaque boucle.

3.5.2 Boucle d'un élément piézoélectrique

La boucle d'un élément piézoélectrique a un sous-programme pour créer tous les fichiers de données (TRANSD.M) chaque fichier de données dans "TRANSD.M" peut demander le programme "PROJET.M" pour faire la simulation, ensuite "PROJET.M" demande aussi deux sous-programmes pour faire le calcul des vitesses aux interfaces. Une fois le calcul fait, on peut obtenir les résultats.

3.5.3 Boucle de deux éléments piézoélectriques

La boucle de deux éléments piézoélectriques a un sous-programme pour créer tous les fichiers de données (RESON.M). Chaque fichier de données dans "RESON.M" peut demander le programme "MEMOIRE.M" pour faire la simulation, ensuite "MEMOIRE.M" demande aussi le calcul pour trouver les Max-Min des vitesses aux interfaces en utilisant le sous-programme "VITESSE.M", ensuite on peut faire sortir les résultats.



3.5.4 Boucle de trois éléments piézoélectriques

La boucle de trois éléments piézoélectriques a un sous-programme pour créer tous les fichiers de données (RESONAT.M). Chaque fichier de données dans "RESONAT.M" peut demander le programme "MEMOIRE5.M" pour faire la simulation, ensuite "MEMOIRE5.M" demande aussi le calcul pour trouver les Max-Min des vitesses aux interfaces en utilisant le sous-programme "VITESSE.M", ensuite on peut faire sortir les résultats.

3.5.5 Boucle de 4 éléments piézoélectriques

La boucle de 4 éléments piézoélectriques a un sous-programme pour créer tous les fichiers de données (RESONA.M). Chaque fichier de données dans "RESONA.M" peut demander le programme "MEMOIRE6.M" pour faire la simulation, ensuite "MEMOIRE6.M" demande aussi le calcul pour trouver les Max-Min des vitesses aux interfaces en utilisant le sous-programme "VITESSE.M", ensuite on peut faire sortir les résultats.

Remarques :

Tous les fichiers de données sont ".m"

4. RÉSULTATS

La simulation et les résultats qu'on présente dans ce chapitre ont été obtenus à l'aide d'un ordinateur avec les caractéristiques techniques suivantes : PC-386, 33 MHZ, avec co-processeur mathématique, avec imprimante laser.

Chaque problème étant bien défini avec un titre, la façon de présenter les résultats est : premièrement, on pose les données pour chaque problème et résultats des simulations et on compare aux résultats de M. Dion [14]. Le programme de M. Dion [14] d'un élément piézoélectrique est un logiciel qui a donné des résultats publiés [4, 6]. Deuxièmement, on présente les résultats graphiques des variables à étudier. Les problèmes qu'on présente pour cette première partie sont 4.1 à 4.4 seulement.

On présente aussi des résultats expérimentaux que nous avons obtenus au Laboratoire d'Ultrasonique et capteurs de l'Université du Québec à Trois-Rivières qui sont comparés aux valeurs calculées. Les problèmes pour cette partie sont 4.5, 4.6 et 4.8.

Pour les résultats expérimentaux, nous avons construit la structure de deux résonateurs : un résonateur à deux éléments piézoélectrique en utilisant deux barreaux (B4 et B8), également un résonateur à trois éléments piézoélectriques (B9, B12 et B10).

Nous avons utilisé le transducteur T14 qui a été construit au Laboratoire et qu'on utilise dans le montage du Laboratoire pour la caractérisation de pâtes à papier.

La simulation de deux transducteurs T14 a été validée seulement pour l'impédance électrique, car nous n'avons pas des résultats de mesure des vitesses. Les résultats expérimentaux pour l'impédance électrique ont été obtenus avec l'appareil HP4192A de Hewlett Parkard et d'un logiciel déjà développé sur place pour le traitement de données.

4.1 SIMULATION D'UN ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE SEUL (AIR-AIR)

TABLEAU 1 : FICHIER CH25-3. PAR DONNÉES : ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE		
Impédance	: 3.42060×10^7 (R)	Remarques : Voir figure 1 pour la structure d'un élément piézoélectrique.
Épaisseur	: 0.9525 mm	
Constante piézoélectrique	: 2.37×10^9 N/C	
Surface	: 5.0711 cm^2	
Capacité électrique	: 3.118 nF	
Vitesse V^D	: 4666 m/s	
Atténuation	: 1.3 Np/m	
Exposant	: 1.8	
Fréquence de référence	: 1000 KHz	
Fréquence inférieure	: 2000 KHz	
Fréquence supérieure	: 3000 KHz	
Nombre d'intervalles	: 200	
Tension électrique	: 1 Volt	
Milieu à droite	: 400 (R)	
Milieu à gauche	: 400 (R)	

TABLEAU 2 : FICHIER CH25-3. PAR					
Résultats des max-min $ Z $ Programme de M. Dion			Résultats des max-min $ Z $ Programme MATLAB		
f(KHz)	max. $ Z $ (ohms)	min. $ Z $ (ohms)	f(KHz)	max. $ Z $ (ohms)	min. $ Z $ (ohms)
2450	8.7163×10^2	---	2450	8.7163×10^2	---
2225	---	4.7101×10^{-1}			4.7099×10^{-1}

TABLEAU 3 : FICHIER CH25-3. PAR			
Valeurs des arguments (dg) Programme de M. Dion		Valeurs des arguments (dg) Programme MATLAB	
f(KHz)	Arg. Z (dg)	f(KHz)	Arg. Z (dg)
2450	- 9.1554	2450	- 9.1555
2225	- 9.4639	2225	- 9.4643

TABLEAU 4 : FICHIER CH25-3. PAR					
Résultats des max-min (vitesses) Programme de M. Dion			Résultats des max-min (vitesses) Programme MATLAB		
f(KHz)	max. U9 (m/s)	min. U9 (m/s)	f(KHz)	max. U9 (m/s)	min. U9 (m/s)
2225	1.432×10^{-1}	---	2225	1.432×10^{-1}	---
f(KHz)	max. U10 (m/s)	min. U10 (m/s)	f(KHz)	max. U10 (m/s)	min. U10 (m/s)
2225	1.432×10^{-1}	---	2225	1.432×10^{-1}	---

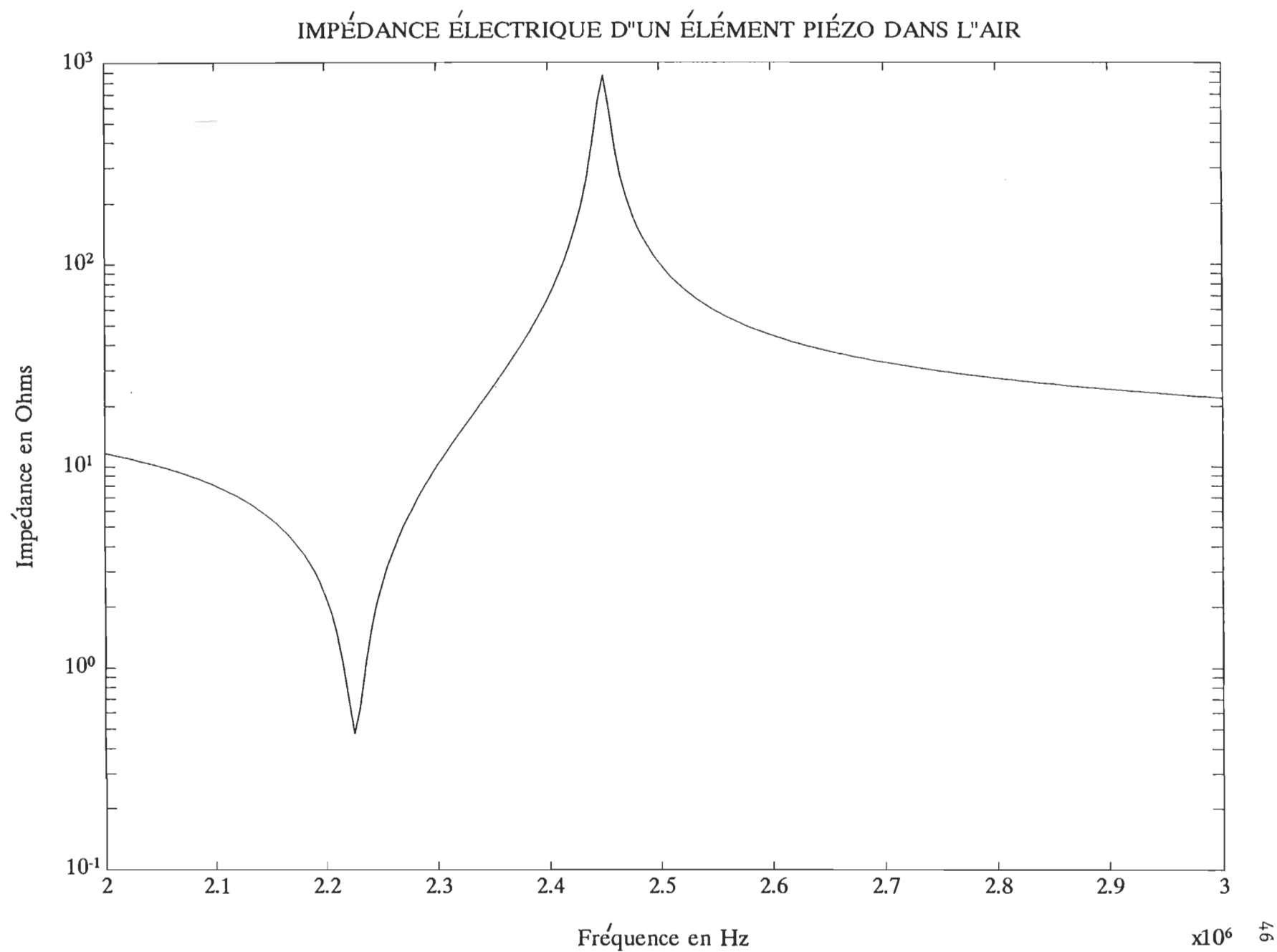


Figure 12 . Impédance électrique. Fichier CH25-3.PAR, tableau 2

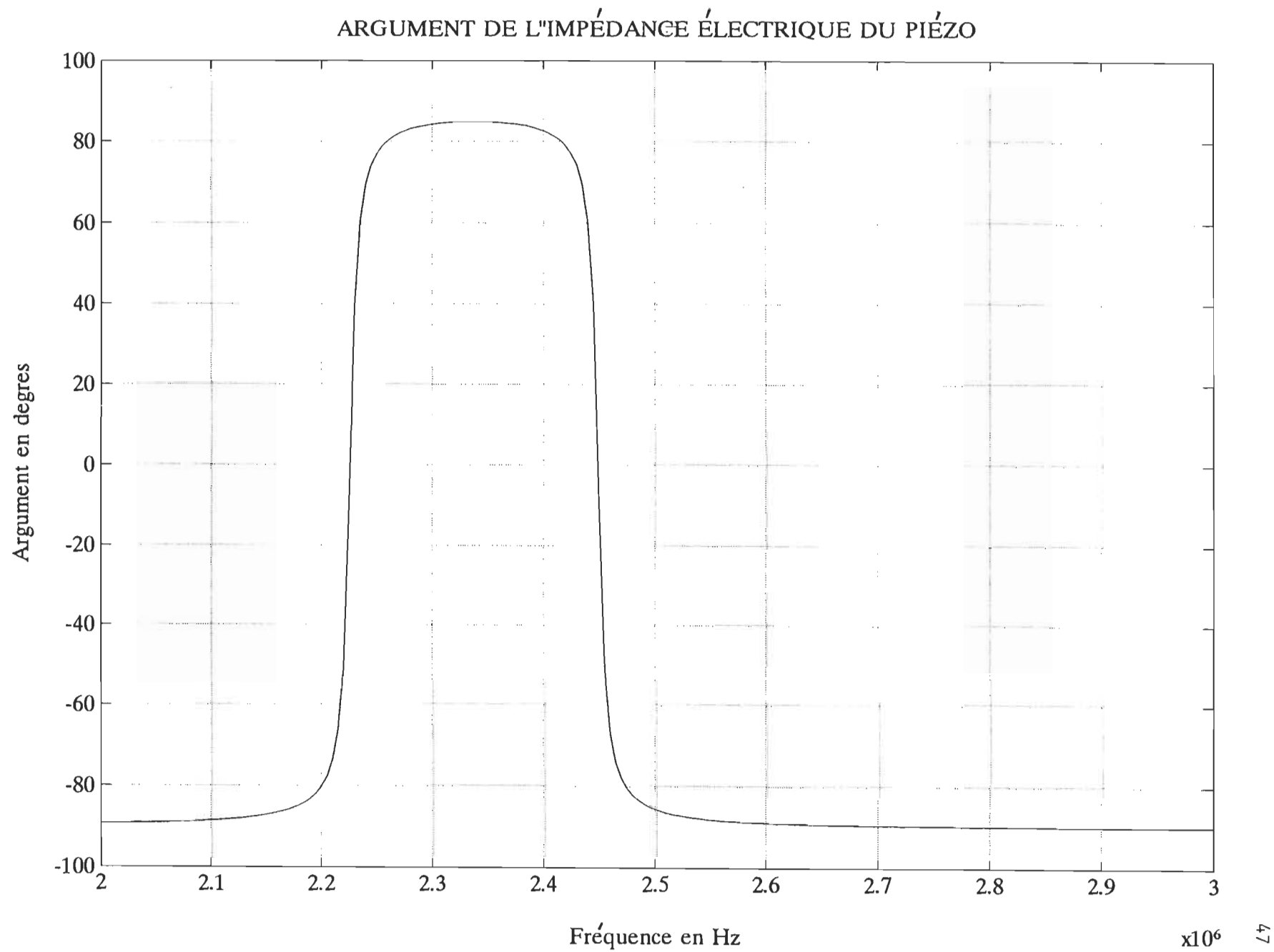


Figure 13 Argument de l'impédance. Fichier CH25-3.PAR, tableau 3

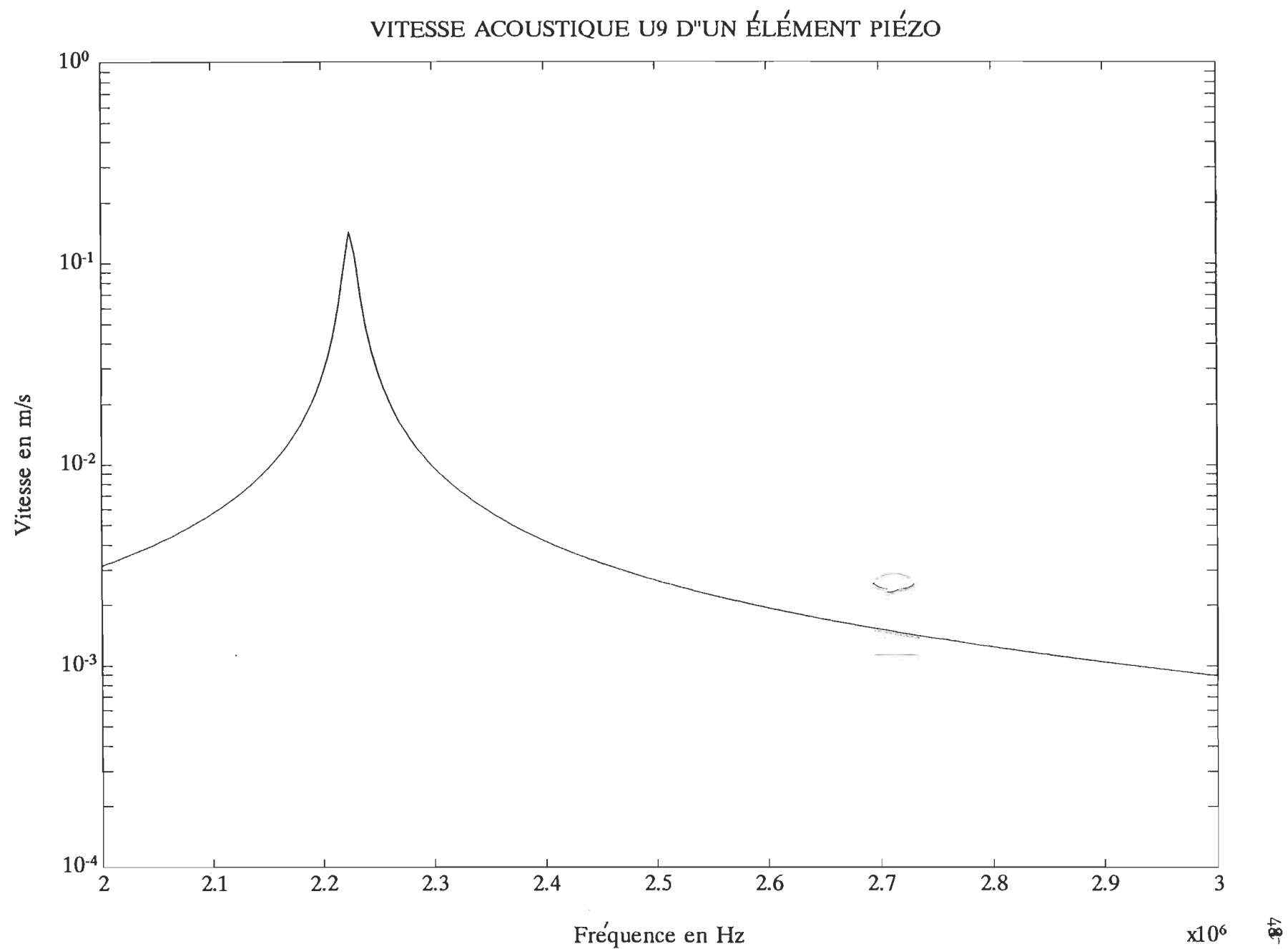


Figure 14 Vitesse acoustique U9. Fichier CH25-3.PAR, tableau 4

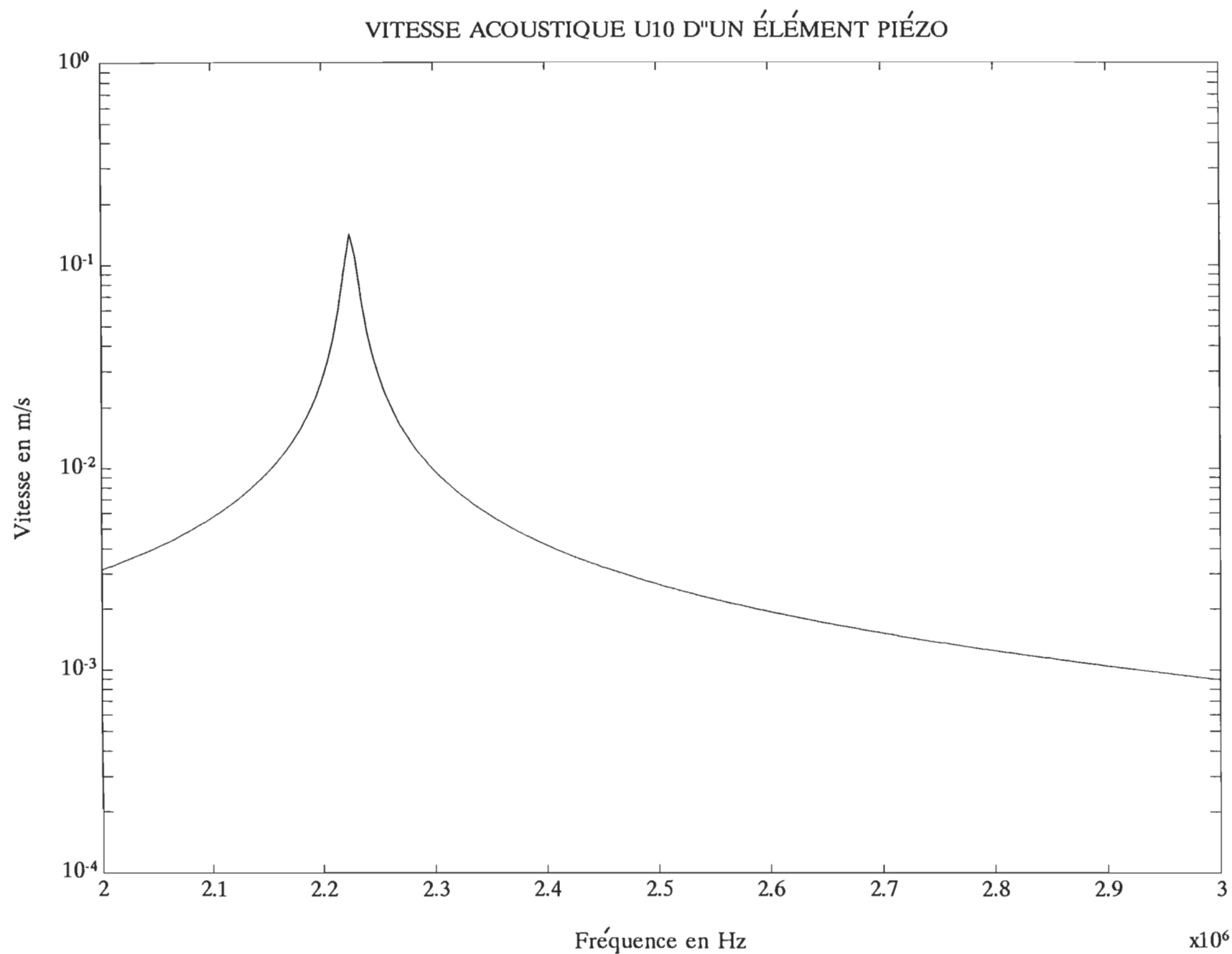


Figure 15 Vitesse acoustique U10. Fichier CH25-3.PAR, tableau 4

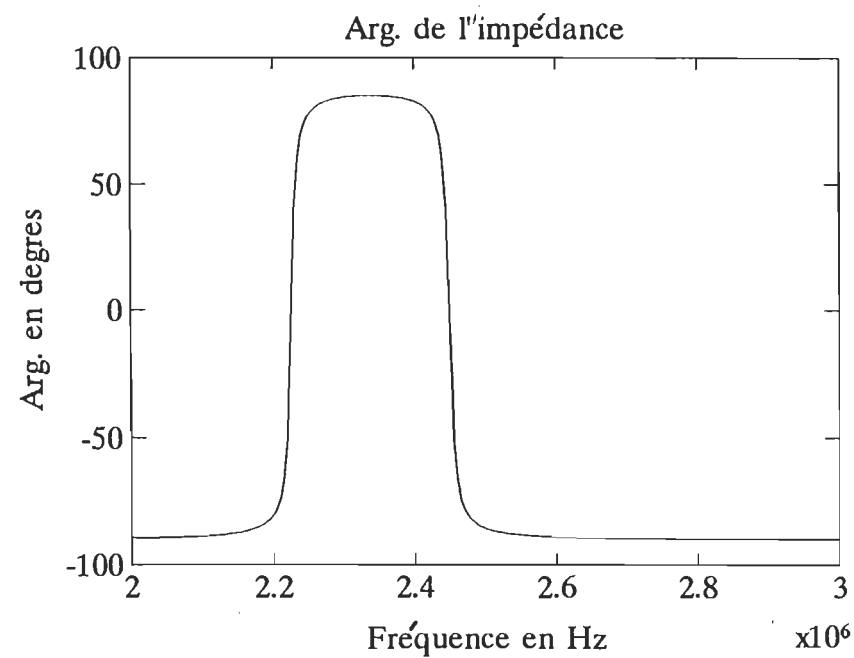
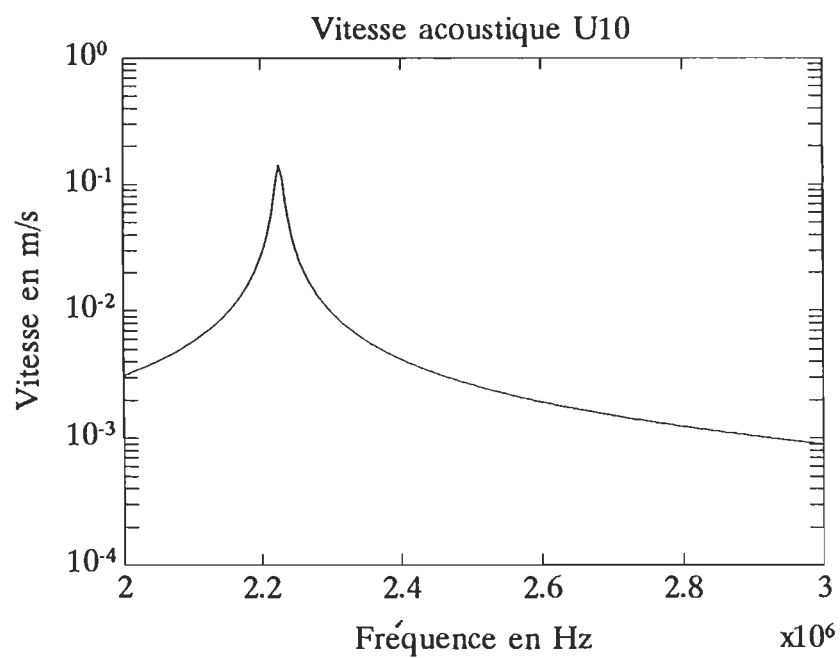
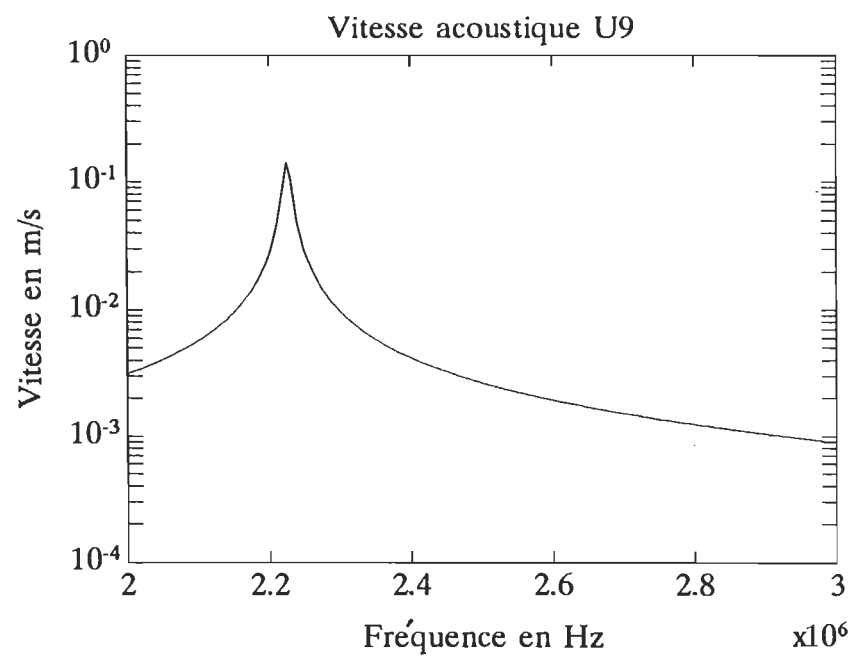
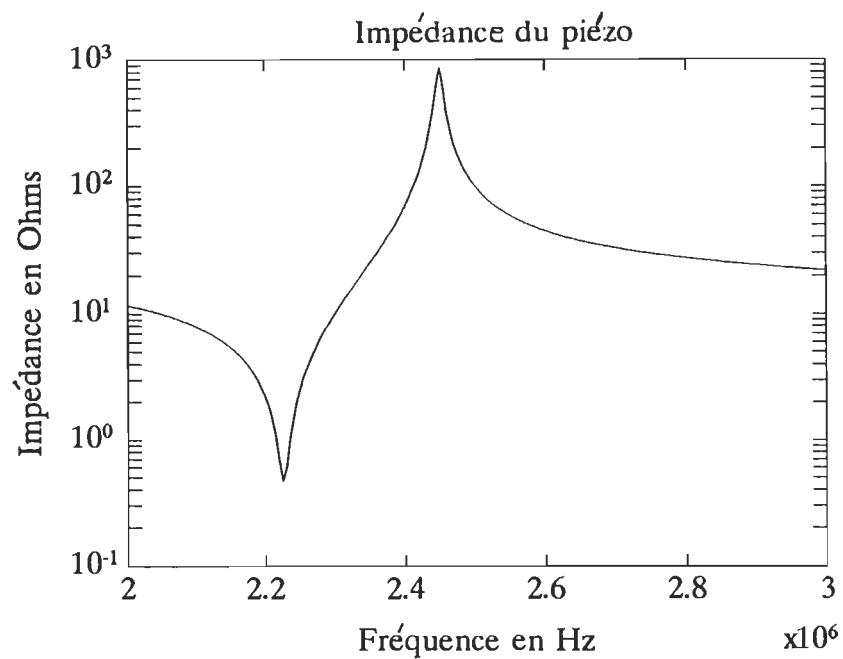


Figure 16a Plusieurs graphiques. Fichier CH25-3.PAR

4.2 SIMULATION D'UN ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE AVEC UNE COUCHE À DROITE

**TABEAU 5 : FICHIER EGE-02 PAR
DONNÉES : ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE**

Impédance	: 3.3751×10^7 (R)
Épaisseur	: 4.27 mm
Constante piézoélectrique	: 2.564×10^9 N/C
Surface	: 5.184 cm^2
Capacité électrique	: 0.760 nF
Vitesse V^D	: 4490 m/s
Atténuation	: 8 Np/m
Exposant	: 0.7
Fréquence de référence	: 525 KHz
Fréquence inférieure	: 100 KHz
Nombre d'intervalles	: 640
Tension électrique	: 1 Volt

Milieu 9 : 400 R (air)

Milieu 12 : 400 R (air)

**TABEAU 6 : FICHIER EGE-02 PAR
DONNÉES : MILIEU 11 (céramique)**

Impédance	: 3.3751×10^7 (R)
Épaisseur	: 4.27 mm
Vitesse	: 4490 m/s
Atténuation	: 8 Np/m
Exposant	: 1.0

**TABEAU 7 : FICHIER EGE-02 PAR
RÉSULTATS MAX-MIN $|Z|$ (Ohms)**

Programme de M. Dion		Programme MATLAB
f(KHz)	Max. de $ Z $	Max. de $ Z $
263.125	3.7109×10^3	3.7109×10^3
527.5	2.0625×10^3	2.0625×10^3
793.75	3.6713×10^2	3.6712×10^2
f(KHz)	Min. de $ Z $	Min. de $ Z $
244.375	1.3341×10^2	1.3341×10^2
493.75	7.9690×10^1	7.9689×10^1
778.75	2.1704×10^2	2.17035×10^2

TABLEAU 8 : FICHIER EGEG-02 PAR RÉSULTATS MAX-MIN (VITESSES AUX INTERFACES EN m/s)		
Programme de M. Dion		Programme MATLAB
f(KHz)	Max. de U9	Max. de U9
244.375	3.4953×10^{-3}	3.49529×10^{-3}
495.625	3.0977×10^{-3}	3.0977×10^{-3}
784.375	1.0562×10^{-3}	1.05262×10^{-3}
f(KHz)	Min. de U9	Min. de U9
351.25	8.9499×10^{-6}	8.9499×10^{-6}
700	1.3905×10^{-5}	1.3905×10^{-5}
1050.625	4.8120×10^{-6}	4.8120×10^{-6}
f(KHz)	Max. de U10	Max. de U10
244.375	3.1917×10^{-4}	3.1917×10^{-4}
495.625	3.1475×10^{-3}	3.1475×10^{-3}
776.875	7.5411×10^{-5}	7.5411×10^{-5}
f(KHz)	Max. de U11	Max. de U11
244.375	2.8627×10^{-3}	2.8627×10^{-3}
495.625	3.1976×10^{-3}	3.1975×10^{-3}
784.375	1.1071×10^{-3}	1.1071×10^{-3}
f(KHz)	Min. de U11	Min. de U11
353.125	2.1682×10^{-4}	2.1682×10^{-4}
664.375	1.67×10^{-4}	1.6710×10^{-4}
1050.625	1.3896×10^{-6}	1.3896×10^{-6}

Structure d'un résonateur à un élément piézoélectrique avec une couche à droite.

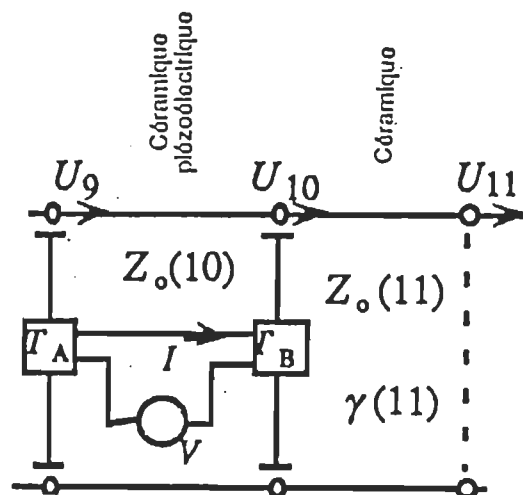


Figure 16b Structure d'un résonateur à un élément piézoélectrique.
Fichier EGE-02.PAR

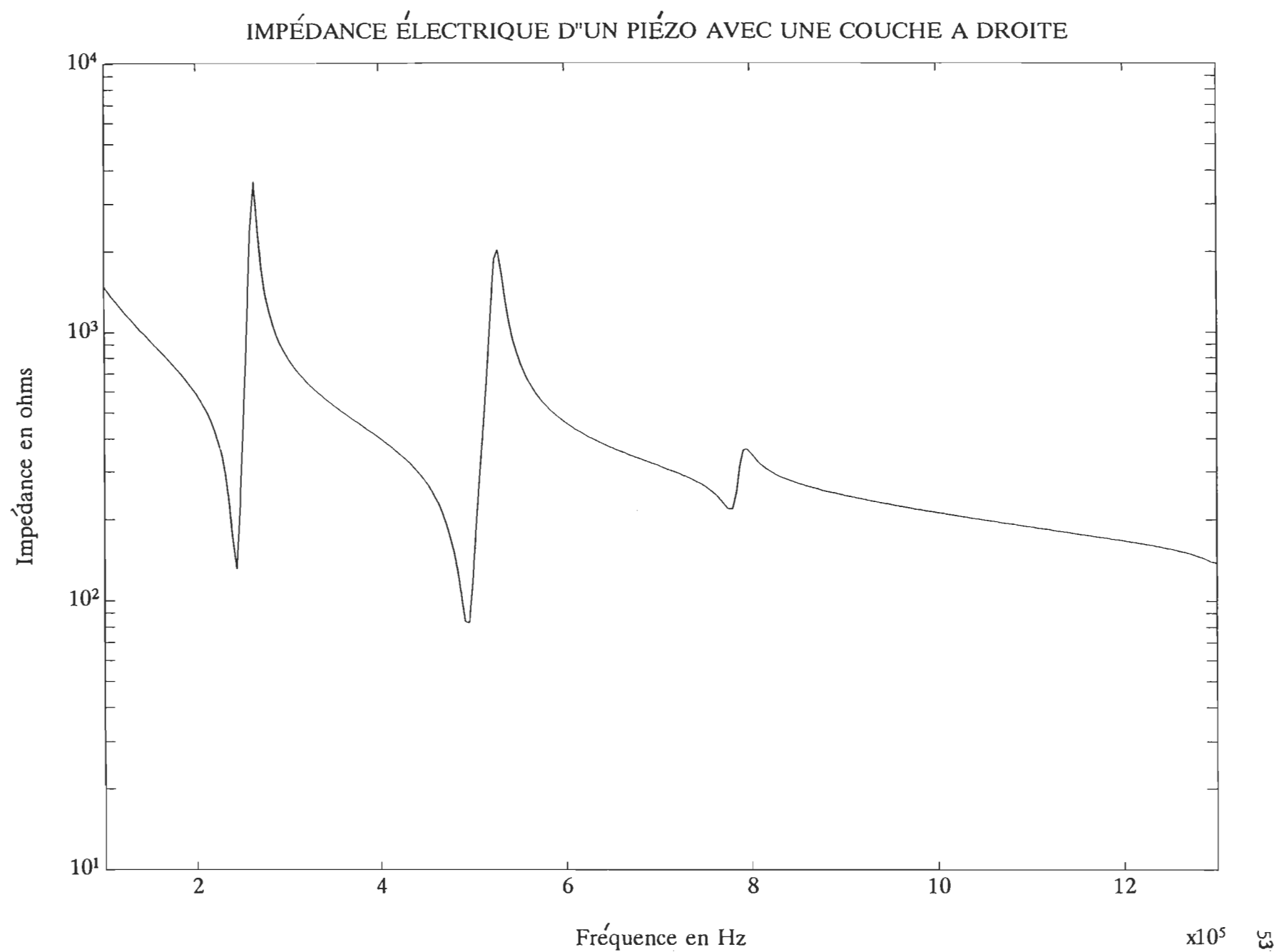


Figure 17 Impédance électrique. Fichier EGEG-02.PAR, tableau 7

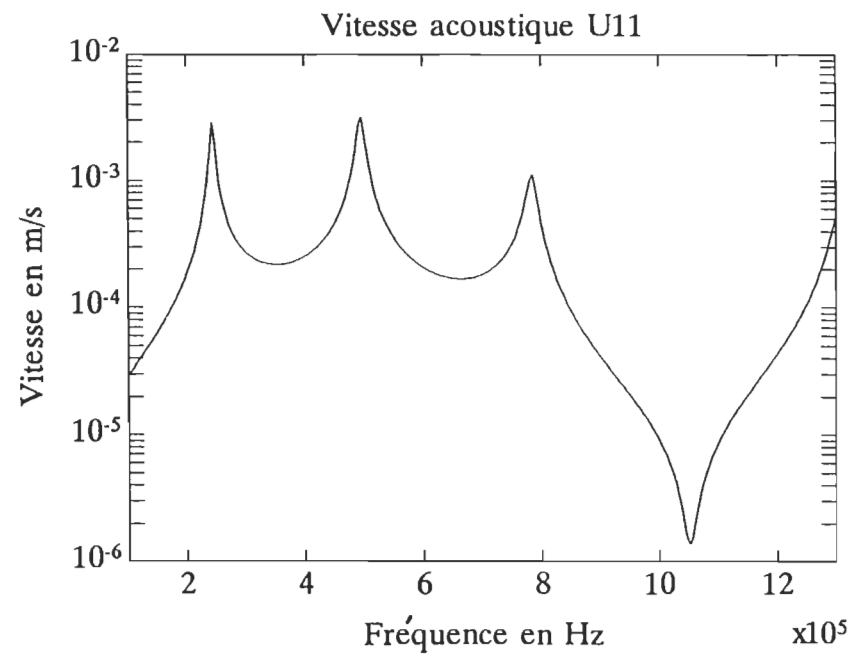
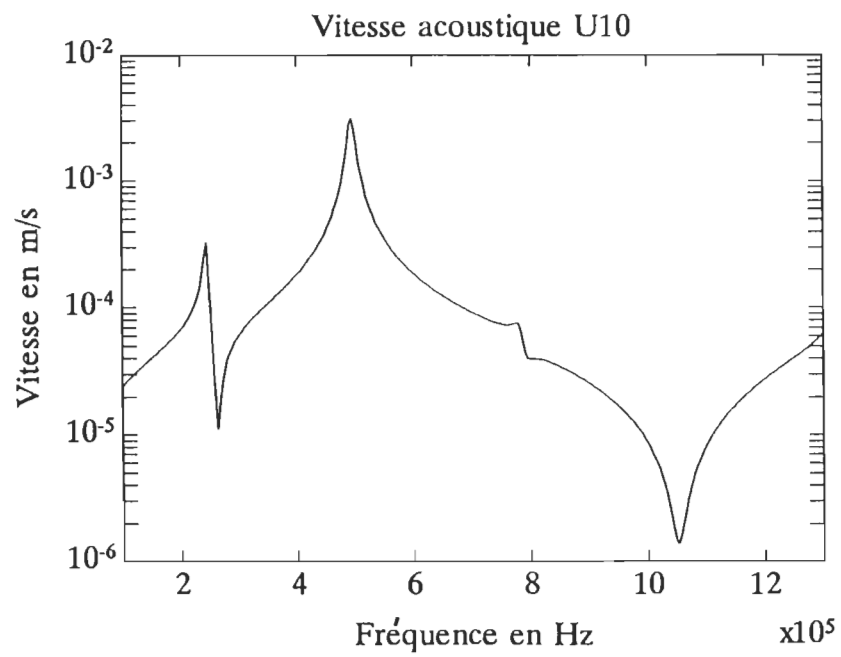
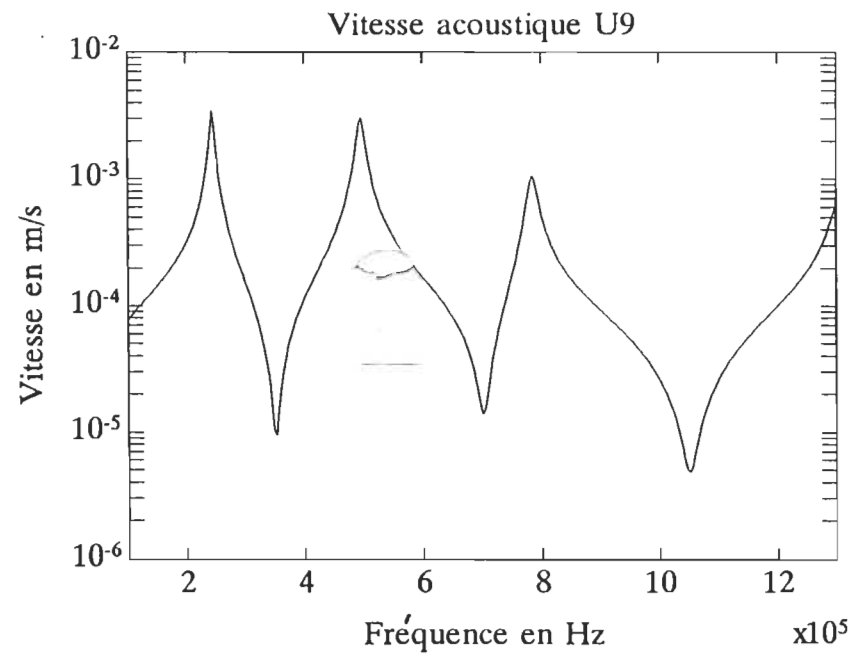
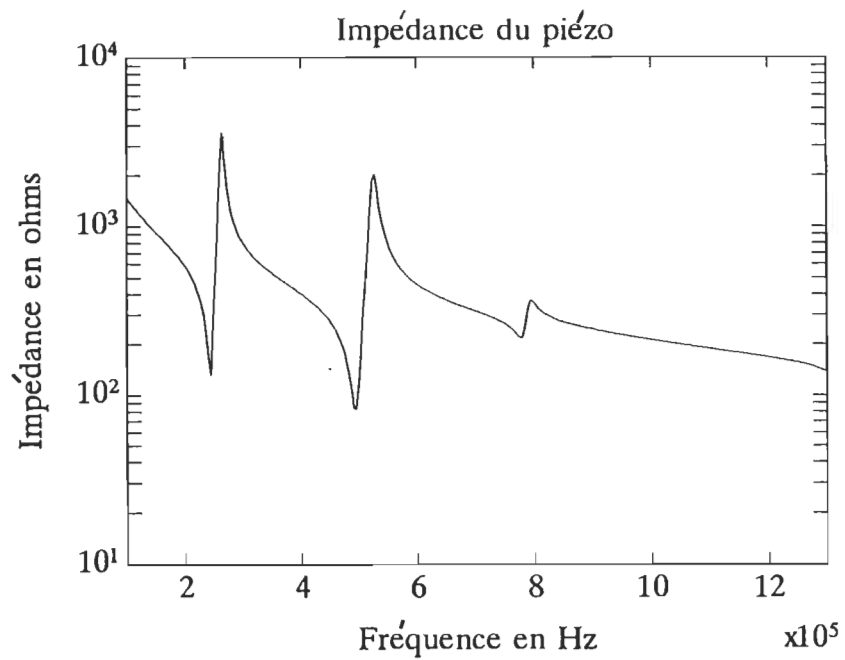


Figure 18a Plusieurs graphiques. Fichier EGEG-02.PAR, tableaux 7 et 8

4.3 SIMULATION D'UN ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE AVEC DEUX COUCHES À DROITE

TABLEAU 9 : FICHIER B-A2EB2.PAR DONNÉES : ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE	
Impédance	: 2.883×10^7 (R)
Épaisseur	: 16.03 mm
Constante piézoélectrique	: 2.86×10^9 N/C
Surface	: 0.314 cm^2
Capacité électrique	: 0.013 nF
Vitesse V^D	: 3720 m/s
Atténuation	: 0.8240 Np/m
Exposant	: 1.13
Fréquence de référence	: 116 KHz
Fréquence inférieure	: 20 KHz
Fréquence supérieure	: 100 KHz
Nombre d'intervalles	: 300
Tension électrique	: 1 Volt

Milieu 9 : 400 R (air)

Milieu 13 : 400 R (air)

TABLEAU 10 : FICHIER B-A2EB2.PAR DONNÉES : AUTRES MILIEUX	
Milieu : 11 (colle)	Milieu : 12 (céramique)
Impédance : 2.5×10^{-8} R	2.965×10^7 R
Épaisseur : 0.05 mm	15 mm
Vitesse : 2000 m/s	3913 m/s
Atténuation : 25 Np/m	0.3 Np/m
Exposant : 1.5	2.2

TABLEAU 11 : FICHIER B-A2EB2.PAR RÉSULTATS MAX-MIN $ Z $ (ohms)			
Programme de M. Dion		Programme MATLAB	
f (KHz)	Max. de $ Z $	f (KHz)	Max. de $ Z $
59.2	3.8502×10^6	59.2	3.8502×10^6
f (KHz)	Min. de $ Z $	f (KHz)	Min. de $ Z $
48.8	5.3815×10^3	48.8	5.3815×10^3

TABLEAU 12 : FICHIER B-A2EB2.PAR RÉSULTATS MAX-MIN (VITESSES AUX INTERFACES EN M/S)		
Programme de M. Dion		Programme MATLAB
f (KHz)	Max. de U9	Max. de U9
48.8	4.1668×10^{-3}	4.1668×10^{-3}
	Mln. de U9	Mln. de U9
80.53	1.8051	1.8051×10^{-6}
	Max. de U10	Max. de U10
48.8	8.2609×10^{-4}	8.2609×10^{-4}
	Mln. de U10	Mln. de U10
60.53	1.3835×10^{-6}	1.3835×10^{-6}
	Max. de U11	Max. de U11
48.8	1.0535×10^{-3}	1.0535×10^{-3}
	Mln. de U11	Mln. de U11
65.33	2.8793×10^{-7}	2.8793×10^{-7}
	Max. de U12	Max. de U12
48.8	2.7350×10^{-3}	2.7350×10^{-3}
	Mln. de U12	Mln. de U12
75.73	8.0967×10^{-5}	8.0967×10^{-5}

Structure d'un résonateur à un élément piézoélectrique avec deux couches à droite.

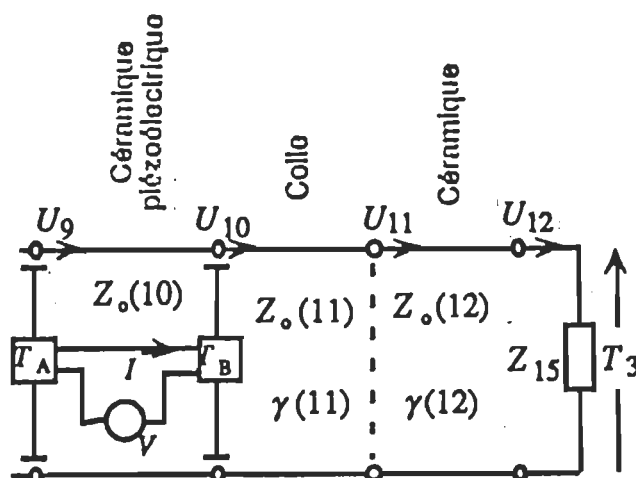


Figure 18b Structure d'un résonateur à un élément piézoélectrique.
Fichier B-A2EB2.PAR

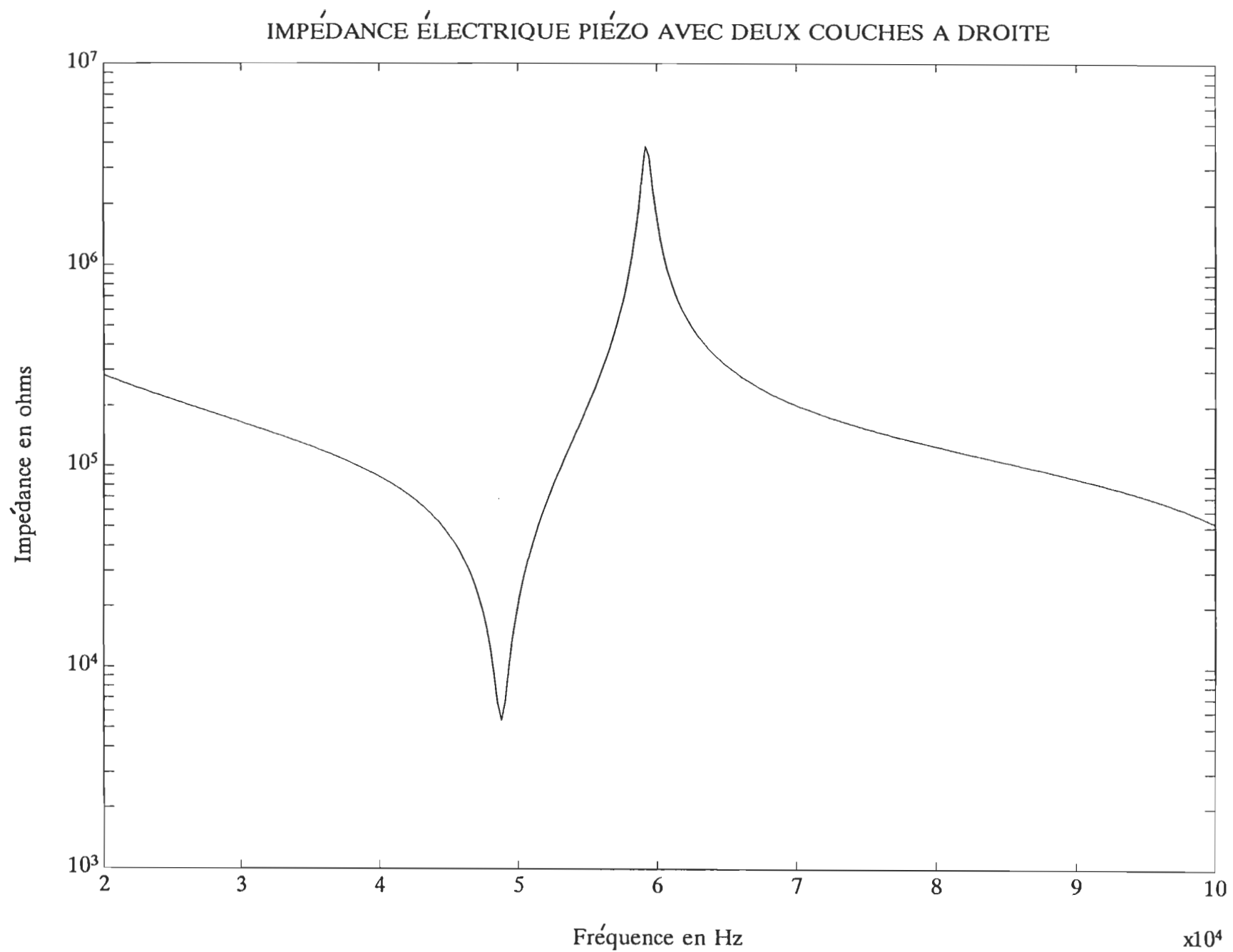


Figure 19 Impédance électrique. Fichier BA2EB2.PAR, tableau 11

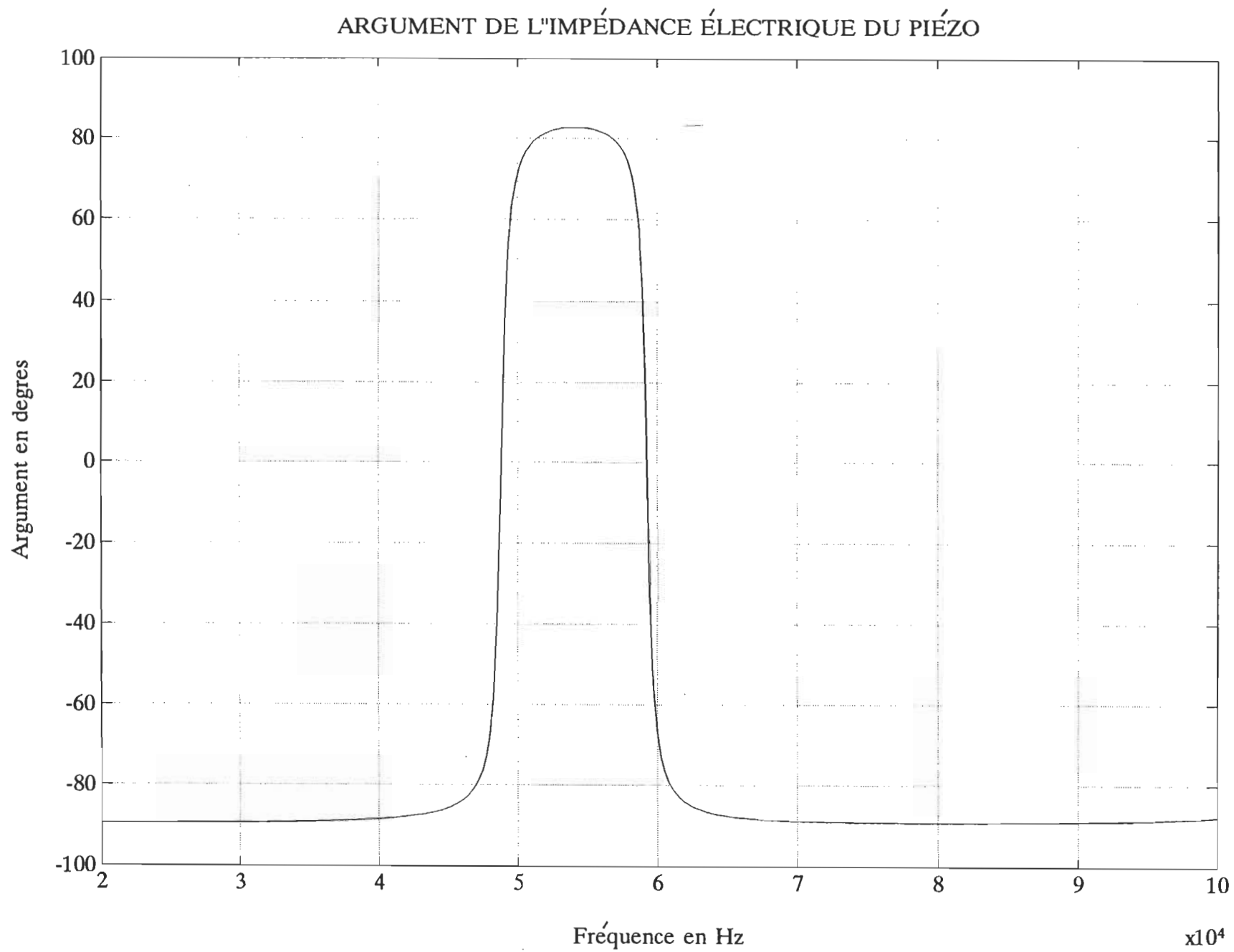


Figure 20 Argument de l'impédance. Fichier BA2EB2.PAR, tableau 11

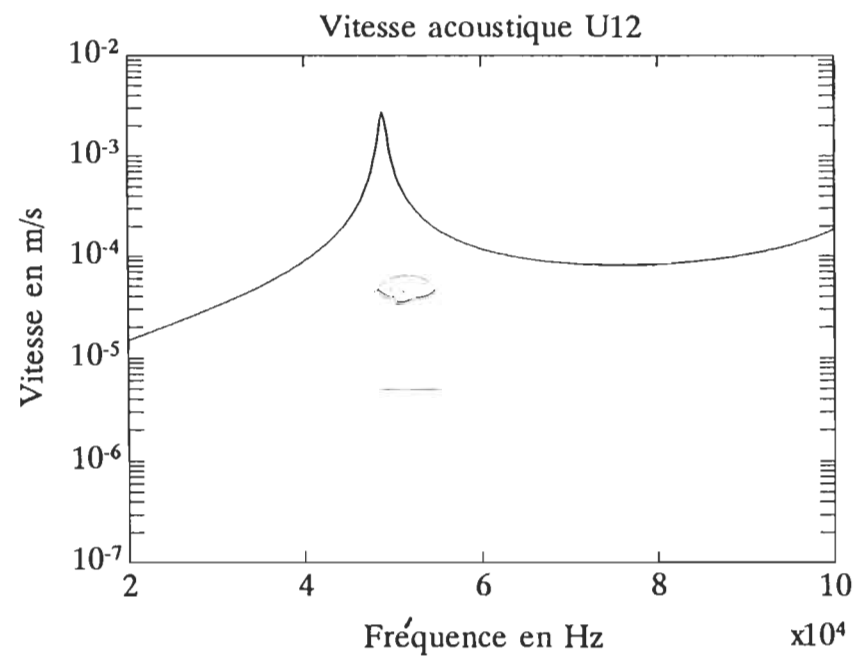
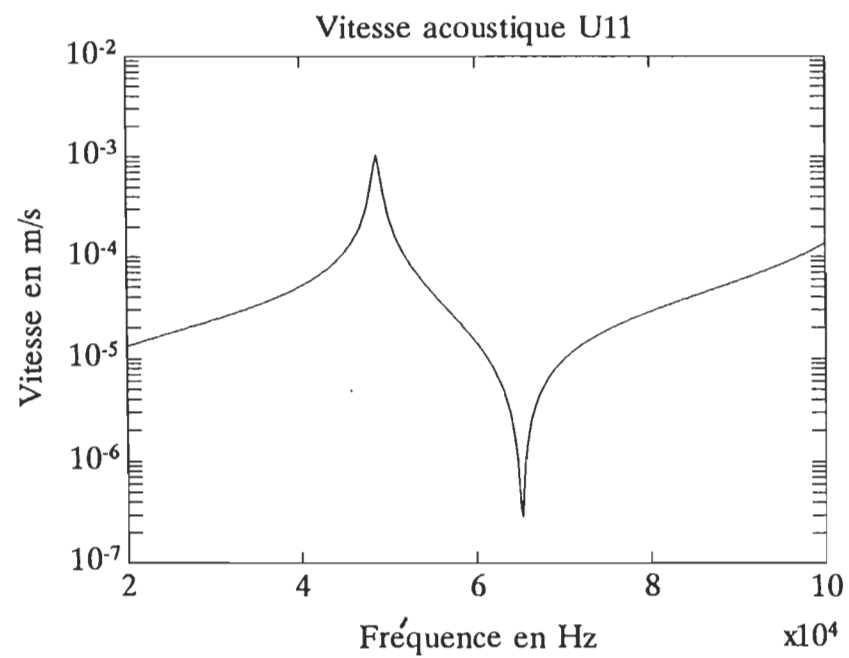
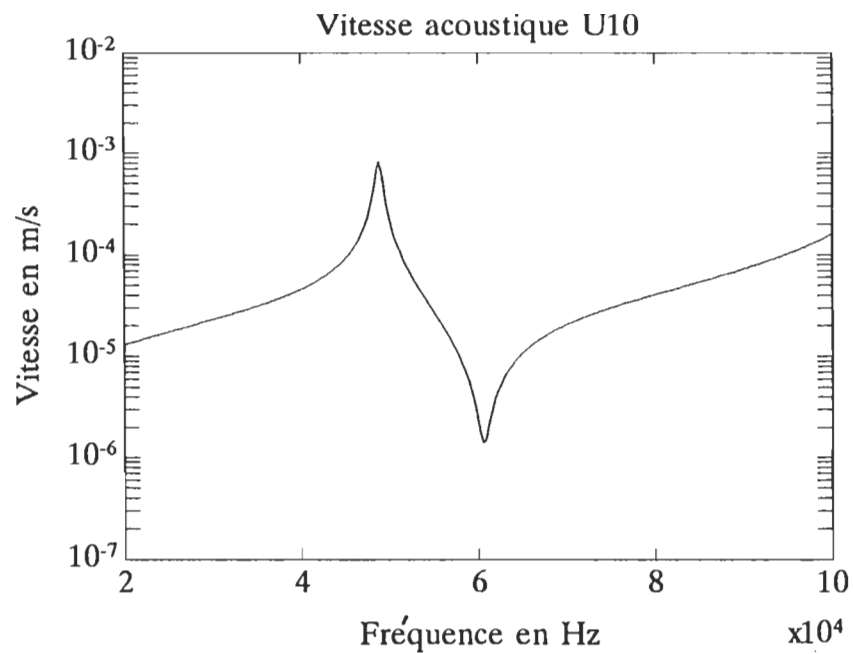
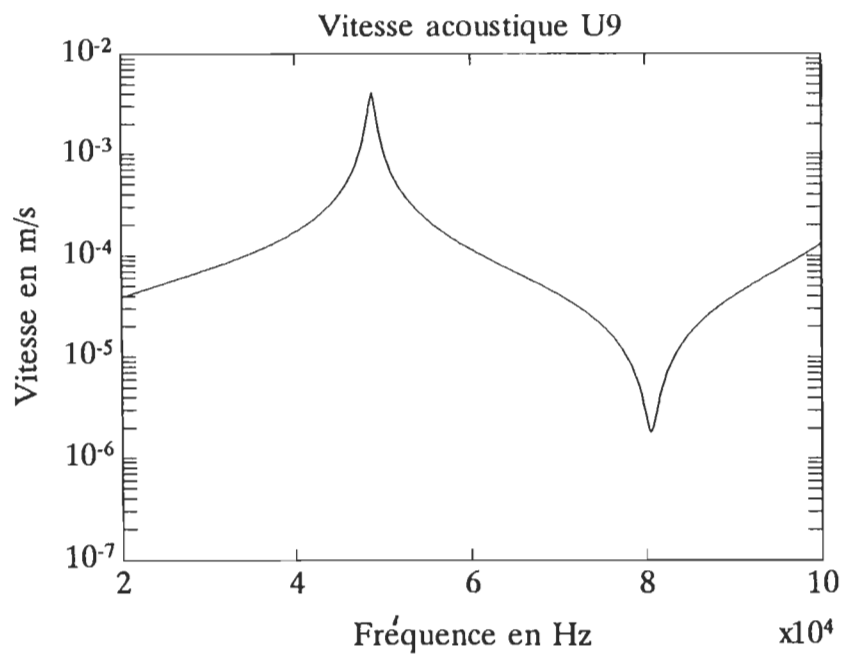


Figure 21a Plusieurs graphiques. Fichier BA2EB2.PAR, tableau 12

4.4 SIMULATION D'UN ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE AVEC DEUX COUCHES À GAUCHE ET DEUX COUCHES À DROITE

TABLEAU 13 : FICHIER CER-COL4.PAR DONNÉES : ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE	
Impédance	: 2.9055×10^7 (R)
Épaisseur	: 8.13 mm
Constante piézoélectrique	: 3.2×10^9 N/C
Surface	: 90 cm^2
Capacité électrique	: 6.798 nF
Vitesse V^0	: 3800 m/s
Atténuation	: 3.5 Np/m
Exposant	: 1.5
Fréquence de référence	: 100 KHz
Fréquence inférieure	: 80 KHz
Fréquence supérieure	: 280 KHz
Nombre d'intervalles	: 400
Tension électrique	: 1 Volt

Milieu 7 : 400 R (air)

Milieu 13 : 400 R (air)

TABLEAU 14 : FICHIER CER-COL4.PAR DONNÉES : AUTRES MILIEUX			
<u>Milieu : 8 (laiton)</u>		<u>Milieu : 9 (colle)</u>	<u>Milieu : 11 (colle)</u>
Impédance	: 4.042×10^7 R	1.2×10^6 R	1.2×10^6 R
Épaisseur	: 1.31 mm	24 mm	24 mm
Vitesse	: 4700 m/s	1000 m/s	1000 m/s
Atténuation	: 2 Np/m	30 Np/m	30 Np/m
Exposant	: 1.5	1.5	1.5
 <u>Milieu : 12 (laiton)</u>			
Impédance	: 4.042×10^7 R		
Épaisseur	: 25.4 mm		
Vitesse	: 4700 m/s		
Atténuation	: 2 Np/m		
Exposant	: 1.5		

TABLEAU 15 : FICHIER CER-COL4.PAR RÉSULTATS MAX-MIN Z (ohms)			
Programme de M. Dion		Programme MATLAB	
f (KHz)	Max. de Z	f (KHz)	Max. de Z
181	8.3398×10^2	181	8.3397×10^2
f (KHz)	Min. de Z	f (KHz)	Min. de Z
126.5	16.60	126.5	16.598

TABLEAU 16 : FICHIER CER-COL4.PAR RÉSULTATS MAX-MIN (VITESSES AUX INTERFACES EN M/S)		
Programme de M. Dion		Programme MATLAB
f (KHz)	Max. de U8	Max. de U8
127	1.4050×10^{-3}	1.4050×10^{-3}
	Max. de U7	Max. de U7
127	1.5050×10^{-3}	1.5050×10^{-3}
	Max. de U9	Max. de U9
127	1.2138×10^{-3}	1.2138×10^{-3}
	Max. de U10	Max. de U10
127	1.5333×10^{-3}	1.5333×10^{-3}
	Min. de U10	Min. de U10
266	3.6013×10^{-5}	3.5989×10^{-5}
	Max. de U11	Max. de U11
127	1.5860×10^{-3}	1.5860×10^{-3}
	Min. de U11	Min. de U11
265.5	4.2053×10^{-5}	4.2053×10^{-5}
	Max. de U12	Max. de U12
127	1.5875×10^{-3}	1.58748×10^{-3}
	Min. de U12	Min. de U12
265.5	4.2225×10^{-5}	4.2225×10^{-5}

Structure d'un résonateur à un élément piézoélectrique avec deux couches à gauche et à droite.

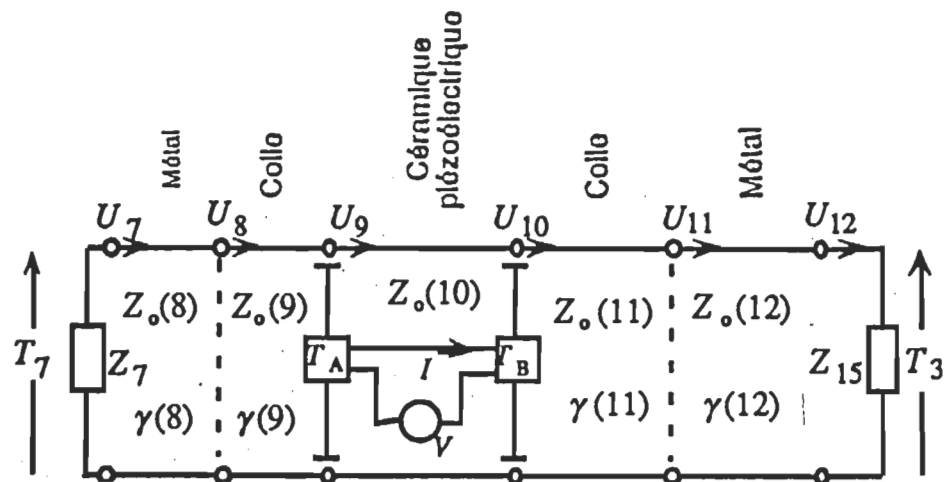


Figure 21b Structure d'un résonateur à un élément piézoélectrique avec deux couches à droite et à gauche.
Fichier CER-COL4.PAR

IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE DU PIÉZO AVEC 2 COUCHES(droite et gauche)

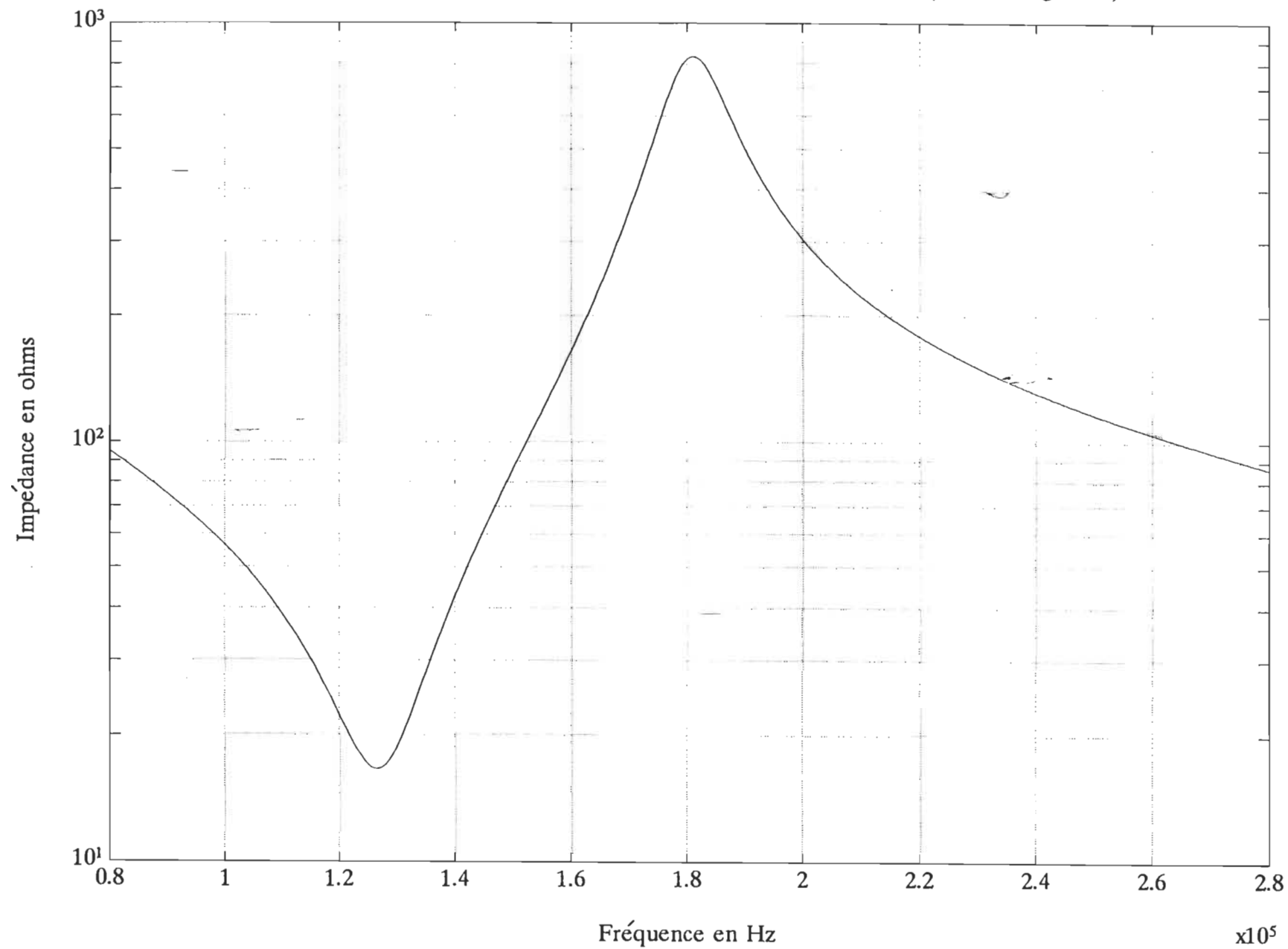


Figure 22 Impédance électrique. Fichier CER-COL4.PAR, tableau 15

ARGUMENT DE L'IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE (piezo avec 2 couches G-D)

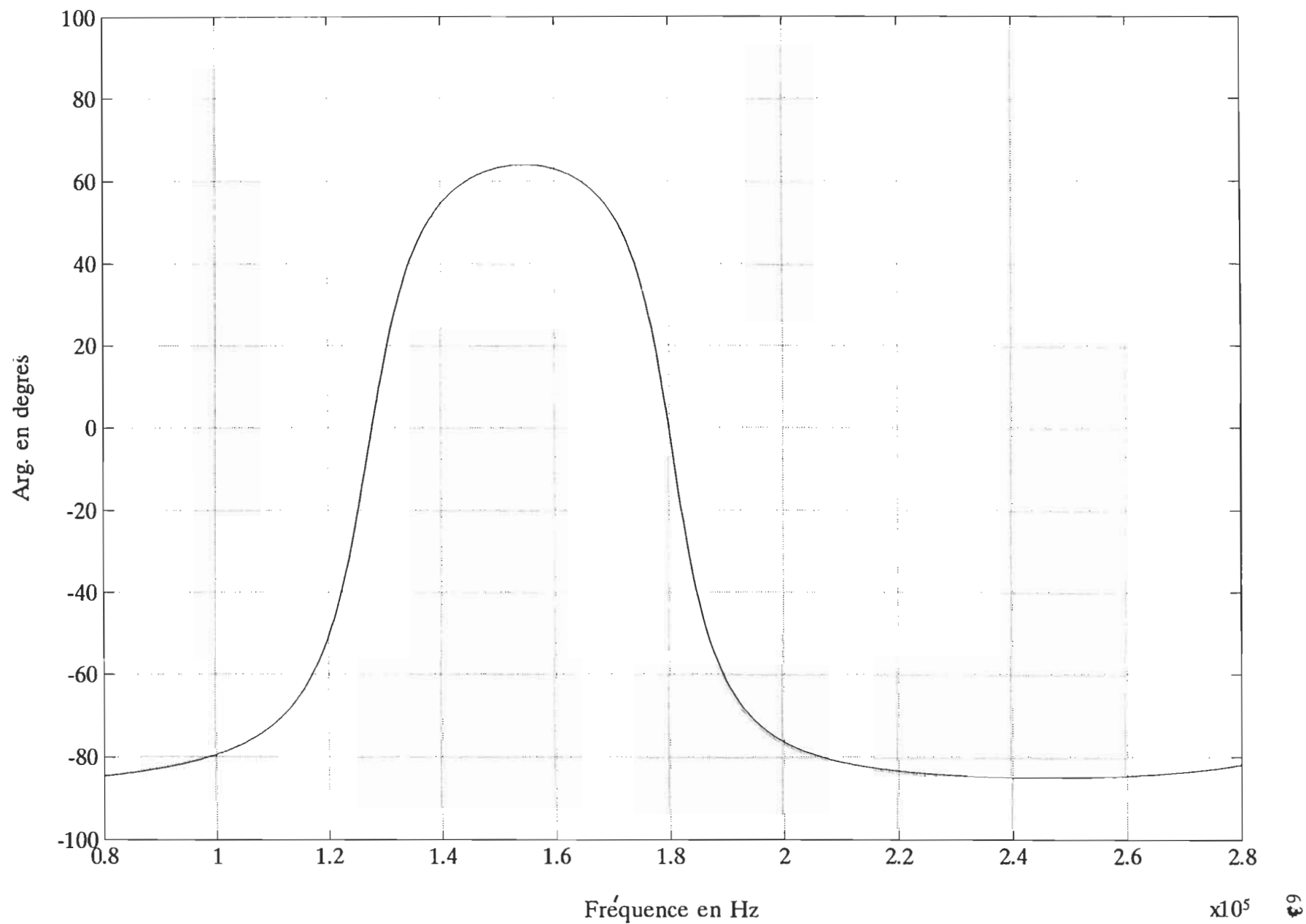


Figure 23 Argument de l'impédance. Fichier CER-COL4.PAR, tableau 15

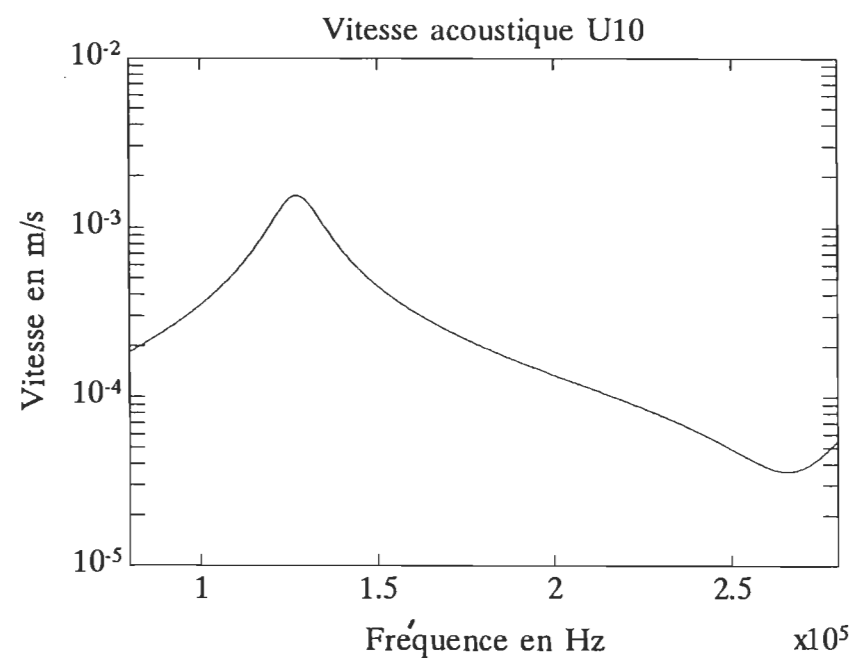
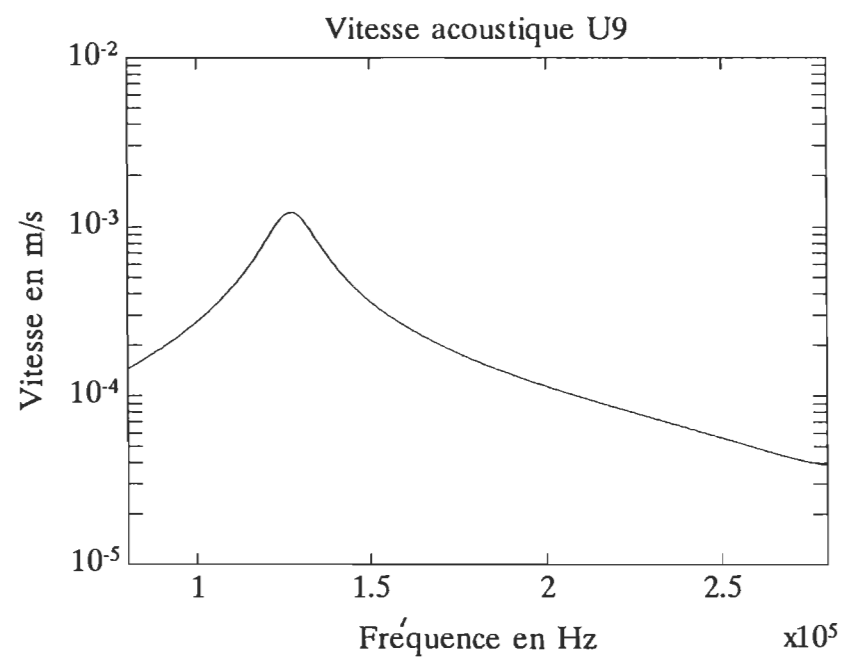
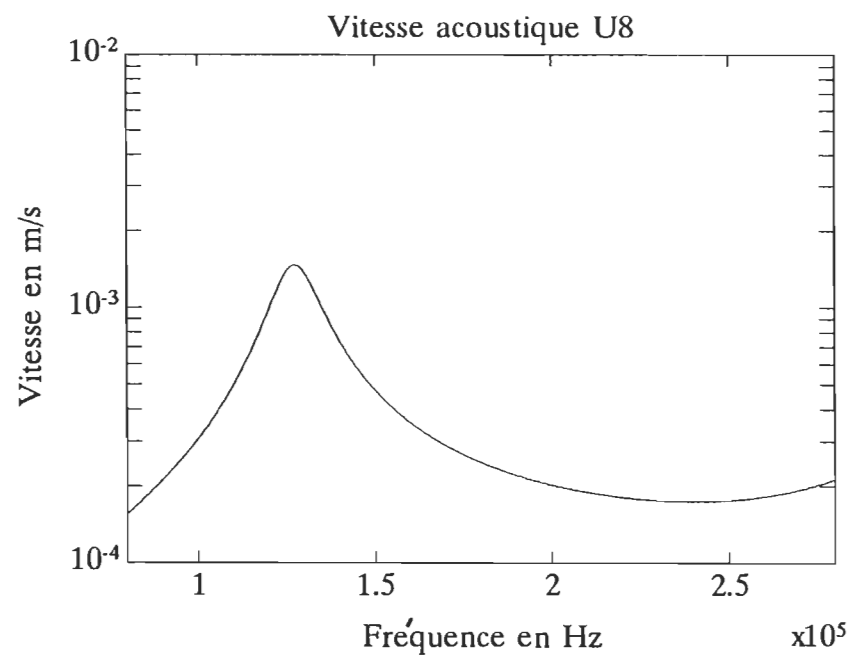
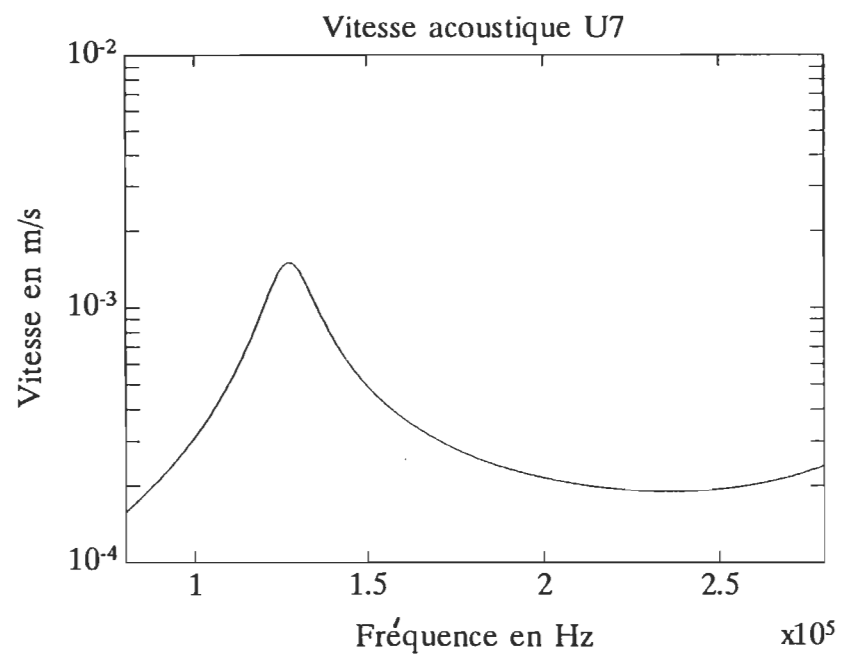


Figure 24 Plusieurs graphiques. Fichier CER-COL4.PAR, tableau 16

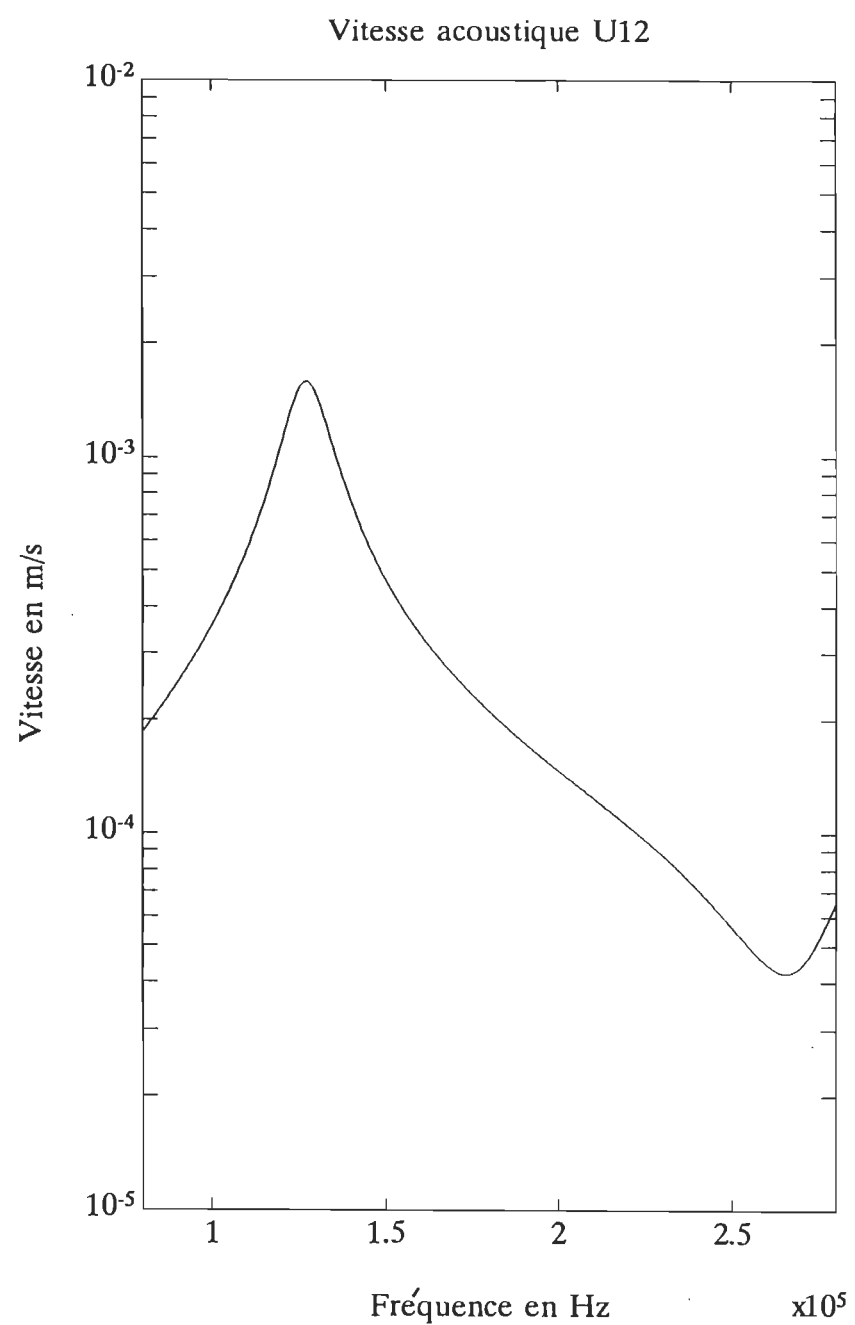
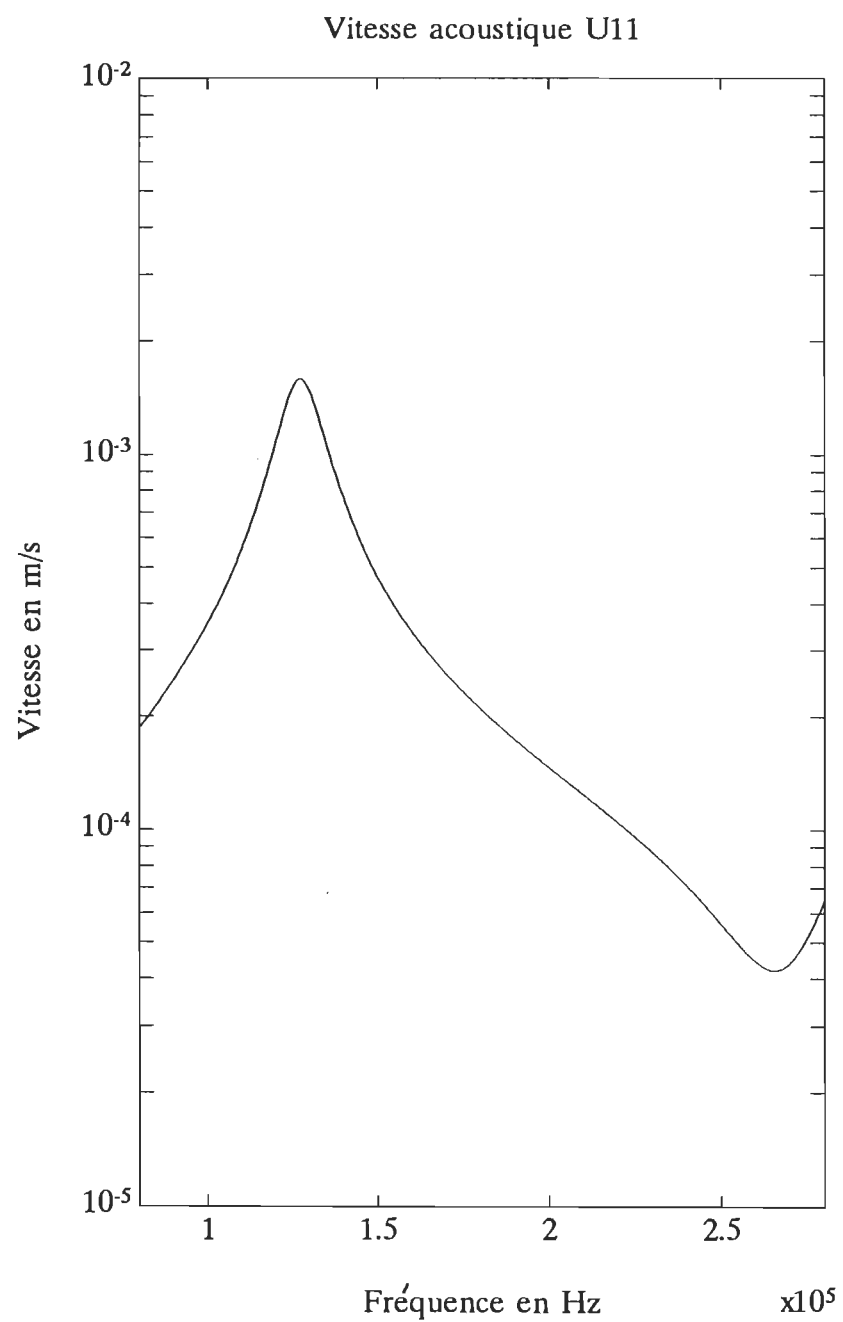


Figure 25a Plusieurs graphiques. Fichier CER-COL4.PAR, tableau 16

4.5 SIMULATION DE DEUX BARREAUX (B4 ET B8) EN PARALLÈLE ÉLECTRIQUE- MENT (EN SÉRIE MÉCANIQUEMENT)

TABLEAU 17 : FICHIER RÉSON 9.M
DONNÉES : ÉLÉMENTS PIÉZOÉLECTRIQUES

Impédance	: 2.62725 X 10 ⁷ (R)
Épaisseur	: 15 mm
Constante piézoélectrique	: 2.65 X 10 ⁹ N/C
Surface	: 0.3142 cm ²
Capacité électrique	: 14 pF
Vitesse V ^D	: 3387 m/s
Vitesse V ^E	: 2476.17 m/s
Atténuation	: 1.4 Np/m
Exposant	: 1.13
Fréquence de référence	: 100 KHz
Fréquence inférieure	: 30 KHz
Fréquence supérieure	: 110 KHz
Nombre d'intervalles	: 638
Tension électrique	: 1 Volt
Remarques : Les deux barreaux ont les caractéristiques presque identiques.	

Milieu 9 : 400 R (air)

Milieu 15 : 400 R (air)

TABLEAU 18 : FICHIER RÉSON9.M
DONNÉES : AUTRES MILIEUX

Milieu 11 (colle)	Milieu 12 (laiton)	Milieu 13 (colle)
Impédance : 3 X 10 ⁶ R	4.6 X 10 ⁷ R	3 X 10 ⁶ R
Épaisseur : 0.012 mm	0.025 mm	0.012 mm
Vitesse : 2500 m/s	6000 m/s	2500 m/s
Atténuation : 30 Kp/m	1.8 Kp/m	30 Kp/m
Exposant : 1.5	1.5	1.5

TABLEAU 19 : FICHIER RÉSON9.M
RÉSULTATS MAX-MIN | Z | (ohms)

f(KHz)	Simulation	Max.	f(KHz)	Mesure	Max.
30	62053.08		30	58590	
55.10	6.133 X 10 ⁶		54.628	2 X 10 ⁶ *	
f(KHz)	Simulation	Min.	f(KHz)	Mesure	Min.
41.28	2562.27		41.180	2587.0	
60.0	273000		60.0	285000	

* L'appareil pour faire la mesure est saturé.

TABLEAU 20 : FICHIER RÉSON9.M RÉSULTATS ARGUMENTS DE L'IMPÉDANCE EN DEGRÉS (dg)			
f(KHz)	Simulation (dg)	f(KHz)	Mesure
30	-88.29	30	-87.43
41.28	-5.35	41.28	-3.03
55.10	11.80	*	-- *
60.0	-88.40	60	-84

* Remarques : L'appareil est saturé

Structure d'un résonateur à deux éléments piézoélectriques (barreaux B4 et B8).

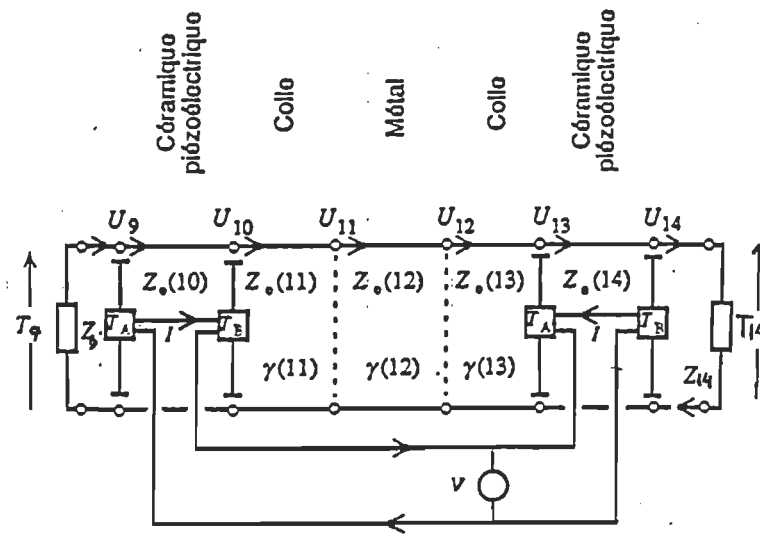


Figure 25b Structure d'un résonateur à deux éléments piézoélectriques.
Fichier Réson 9.m

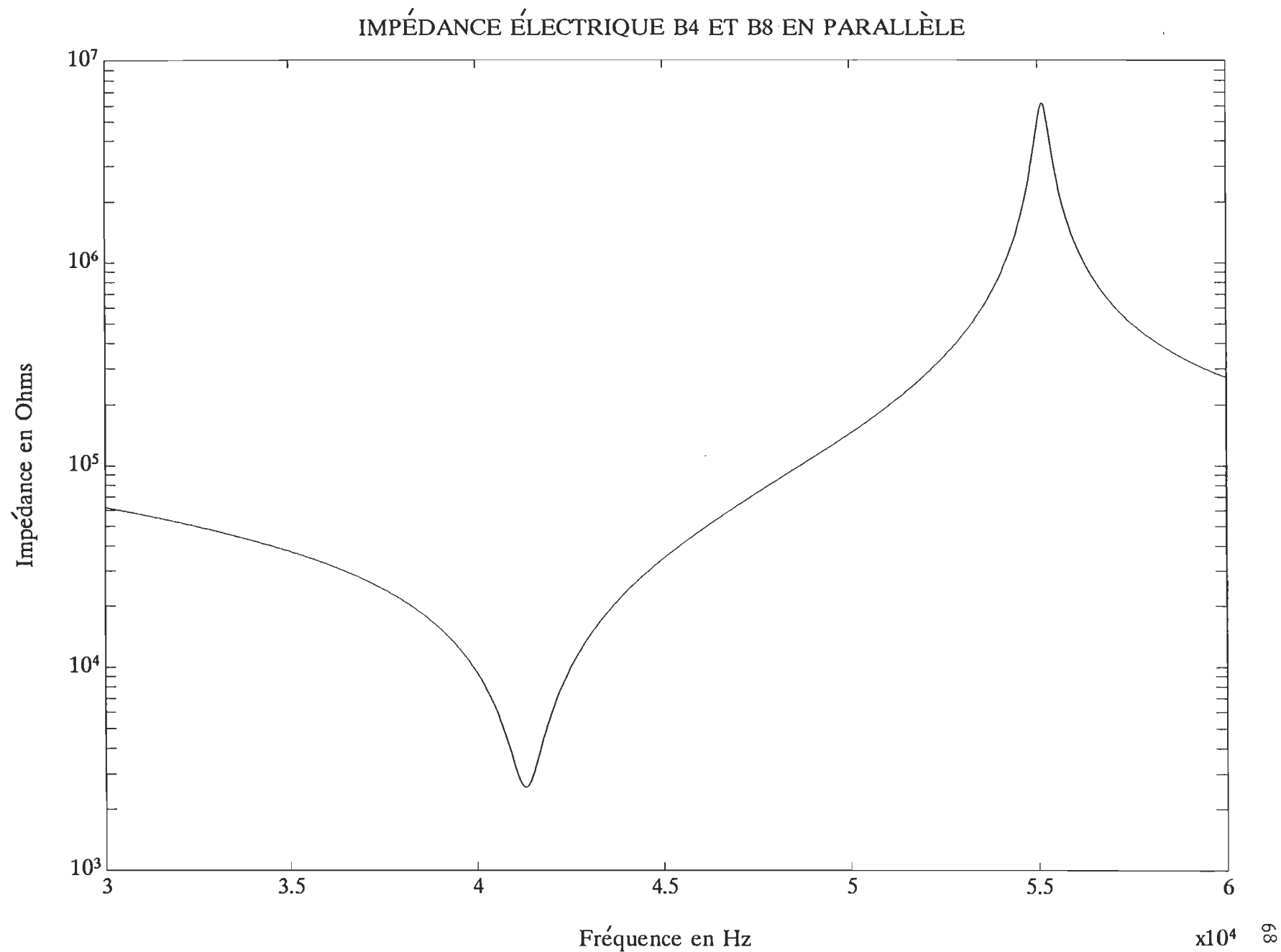


Figure 26 Plusieurs graphiques. Fichier Réson 9.m, tableau 19

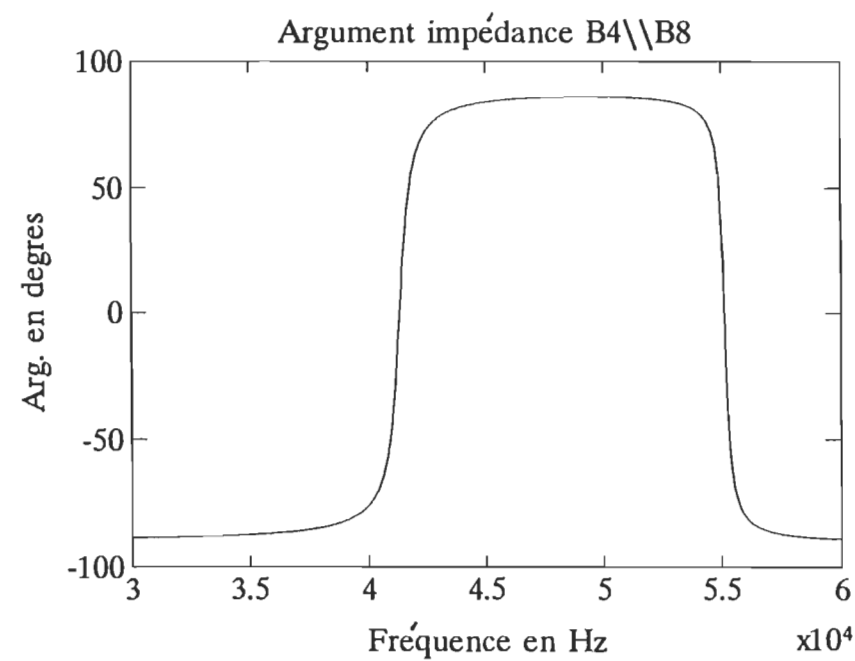
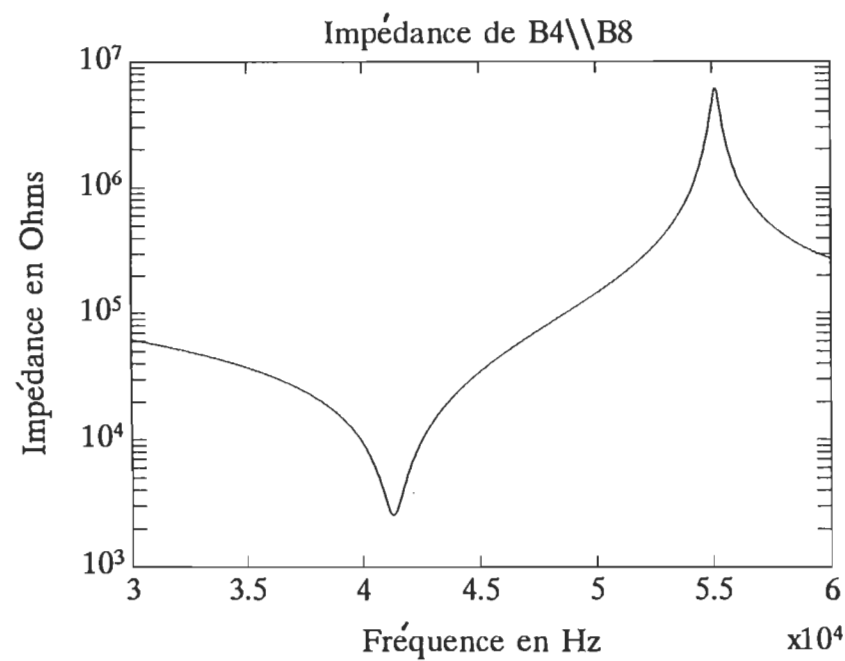
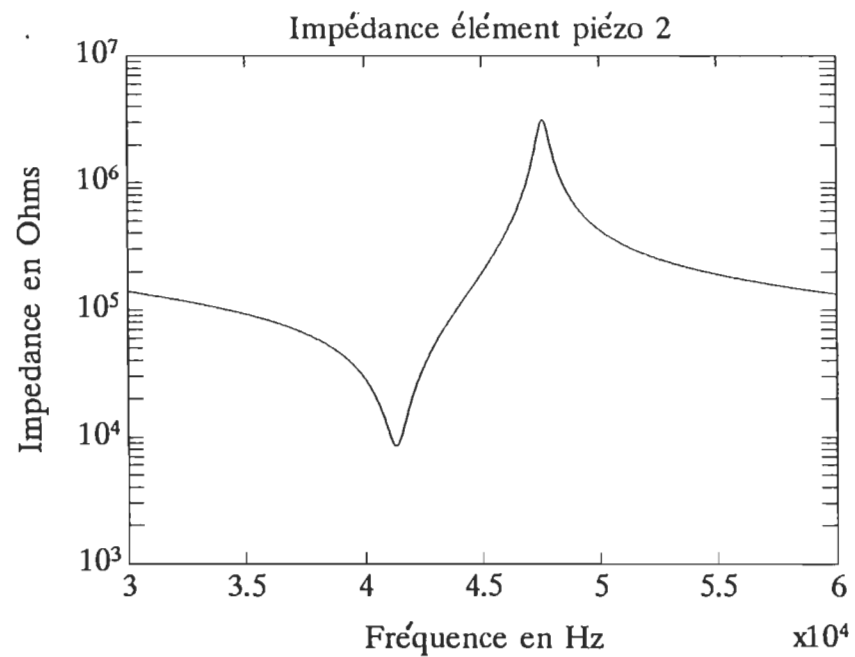
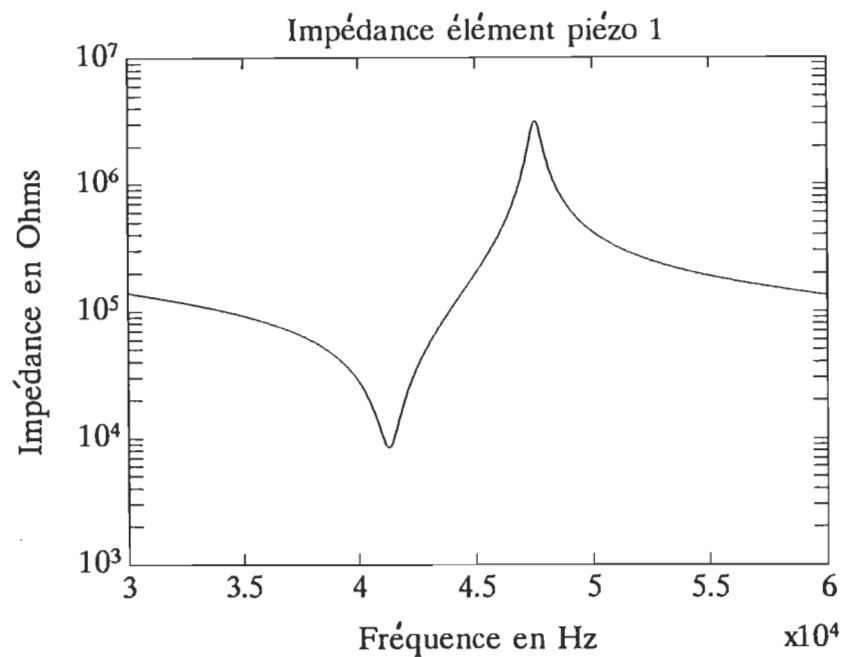


Figure 27 Plusieurs graphiques. Fichier Réson 9.m, tableaux 19 et 20

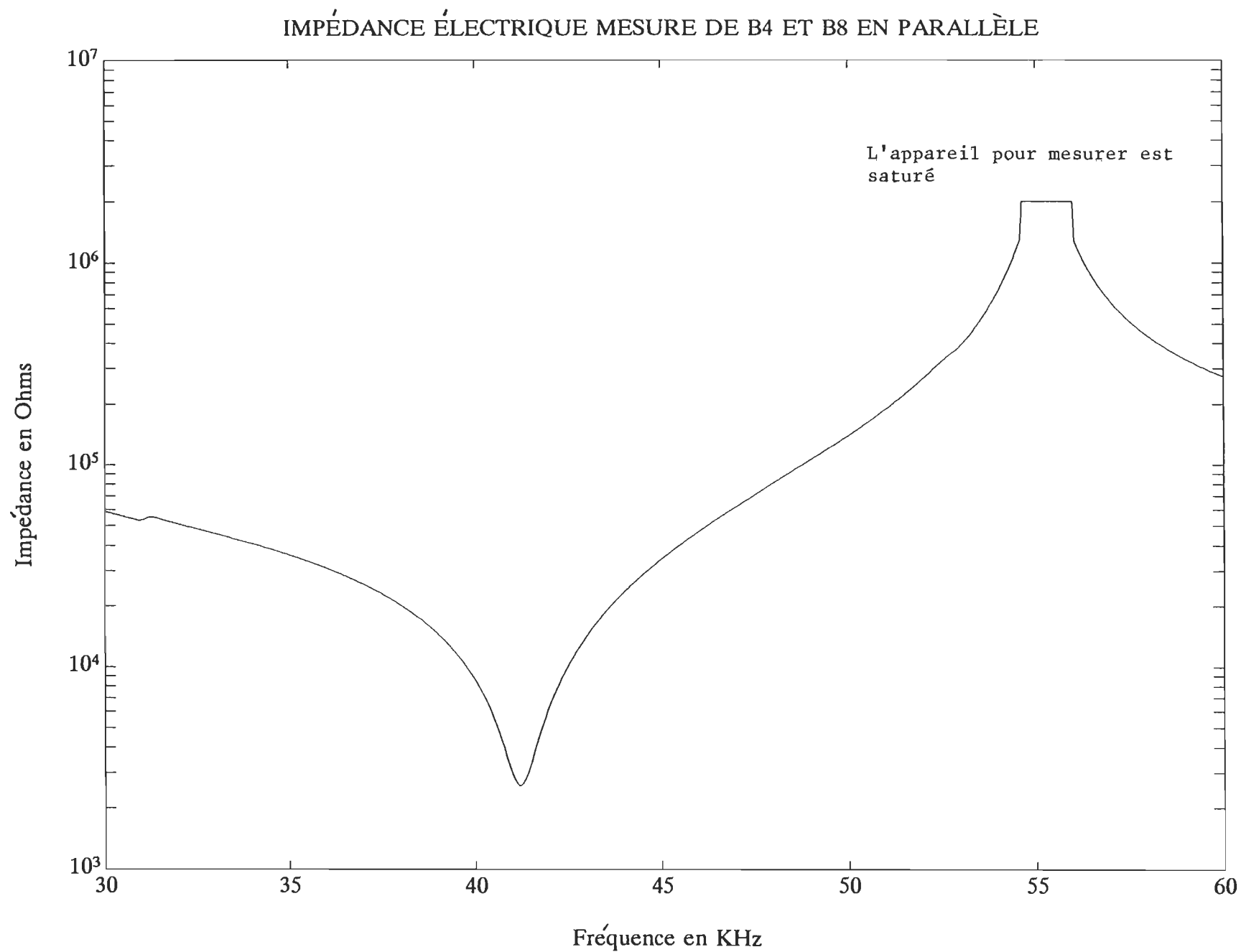


Figure 28 Impédance électrique mesuré. Fichier Réson 9.m, tableau 19

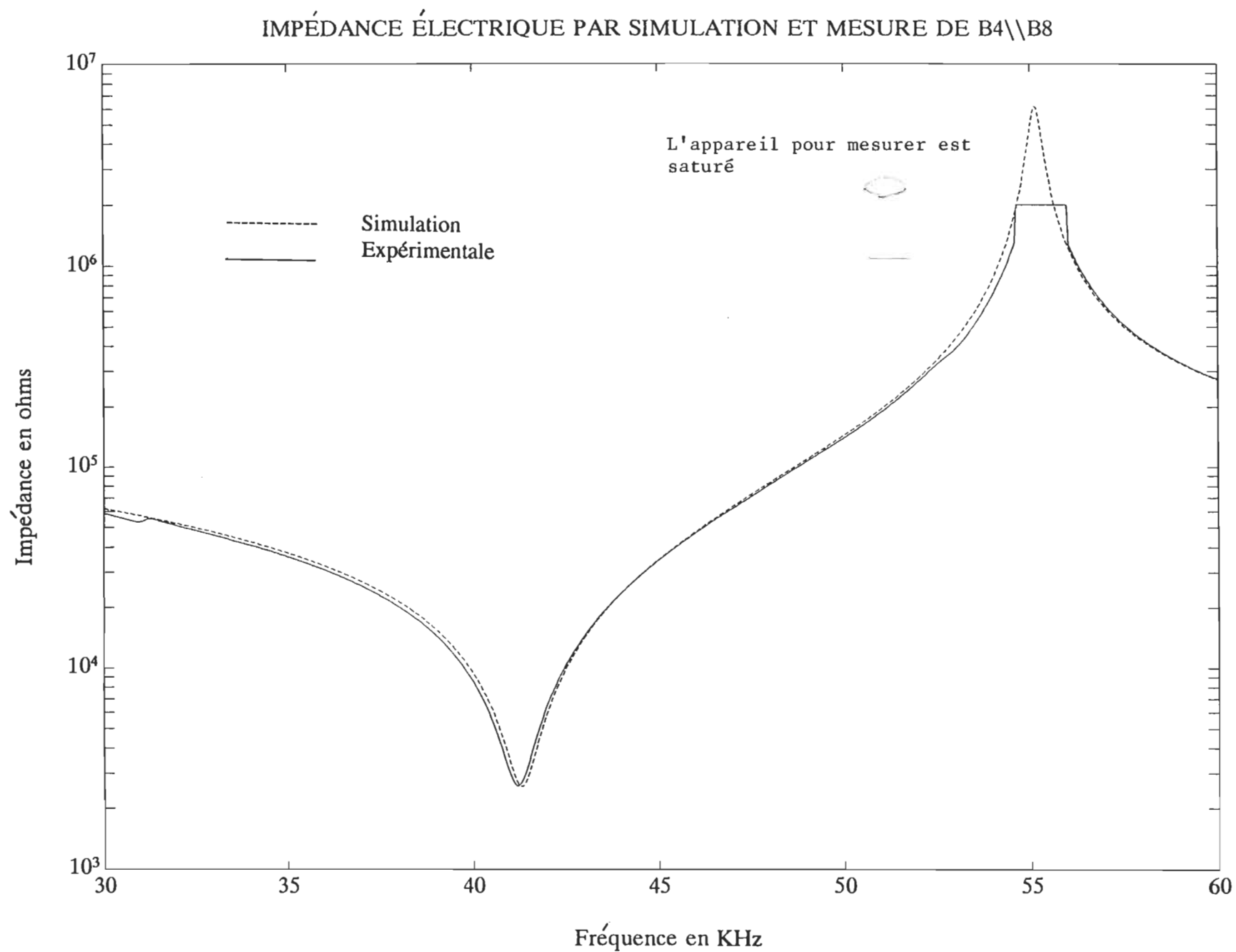


Figure 29 Impédance électrique. Fichier Réson 9.m, tableau 19

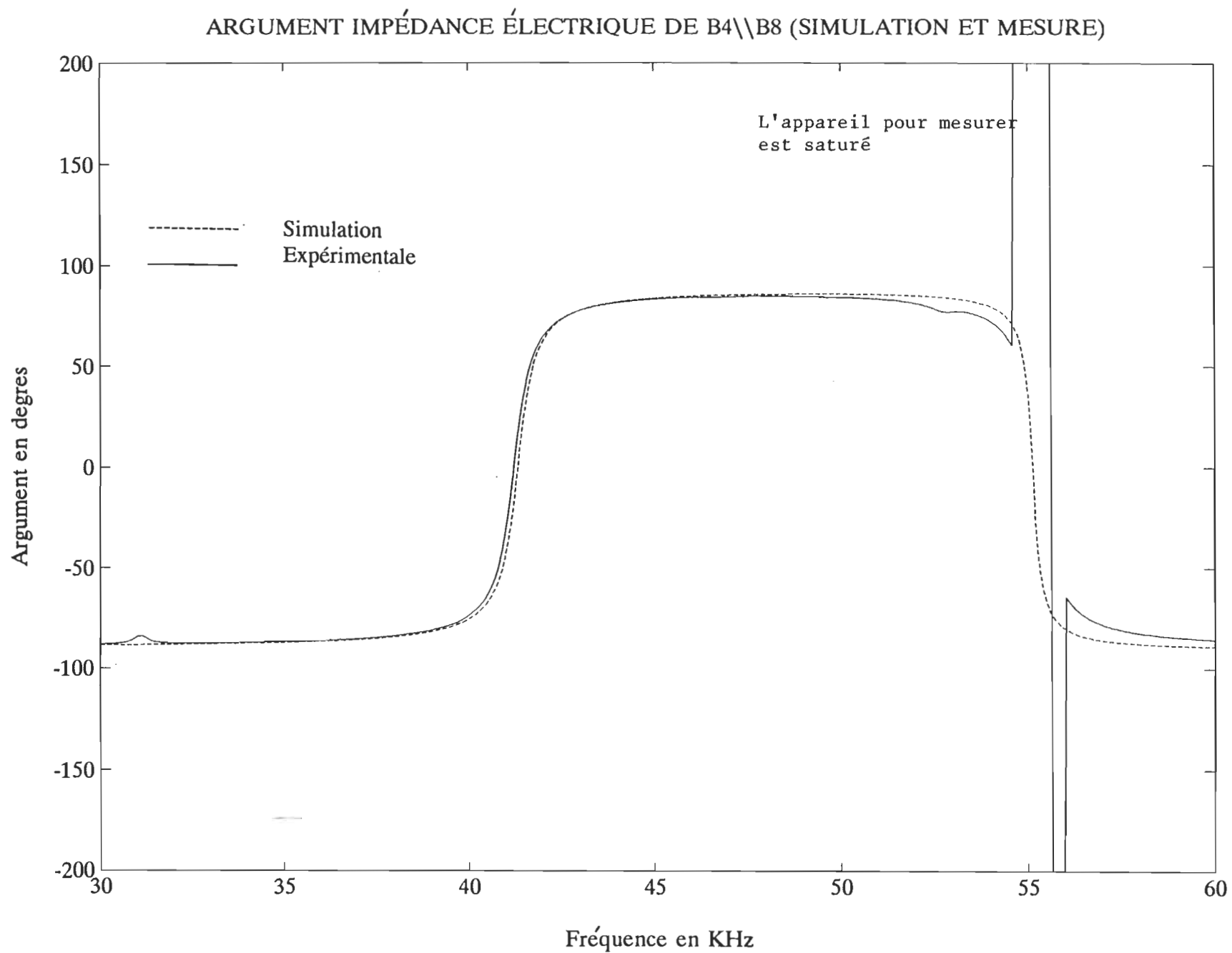


Figure 30 Argument de l'impédance. Fichier Réson 9.m, tableau 20

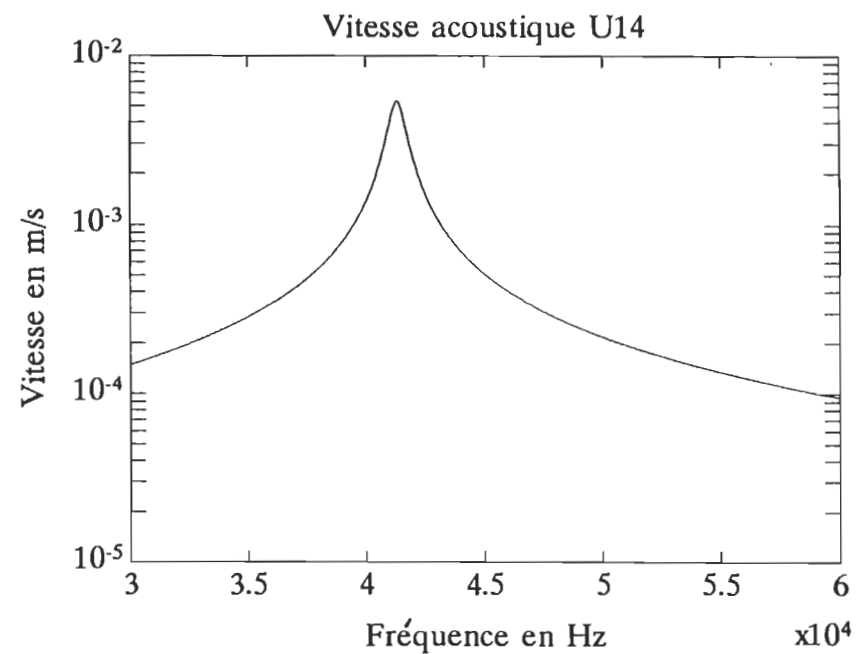
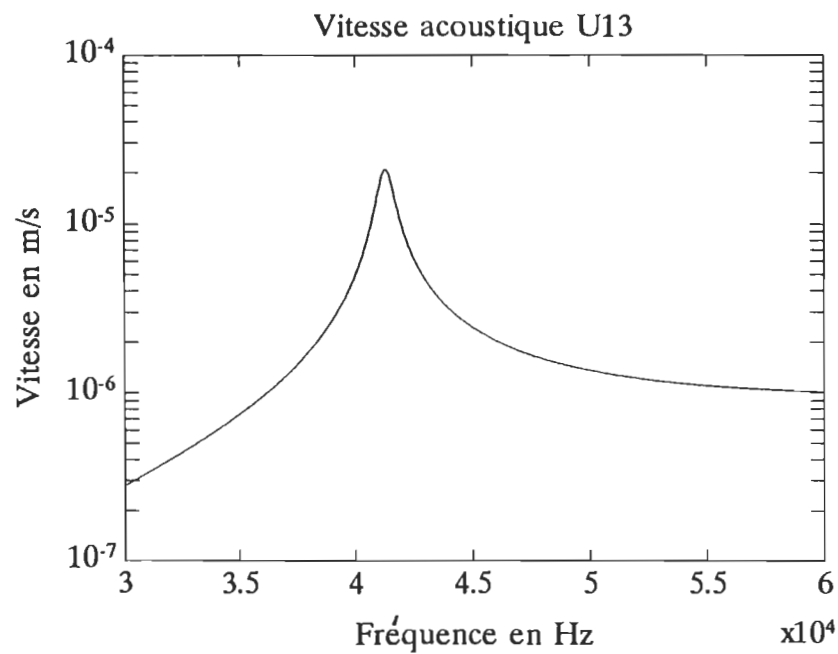
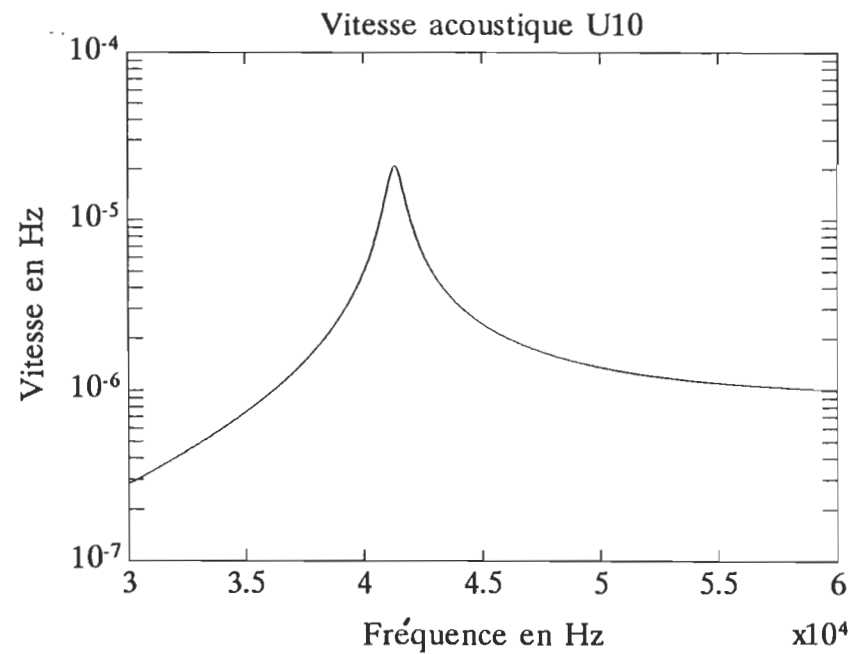
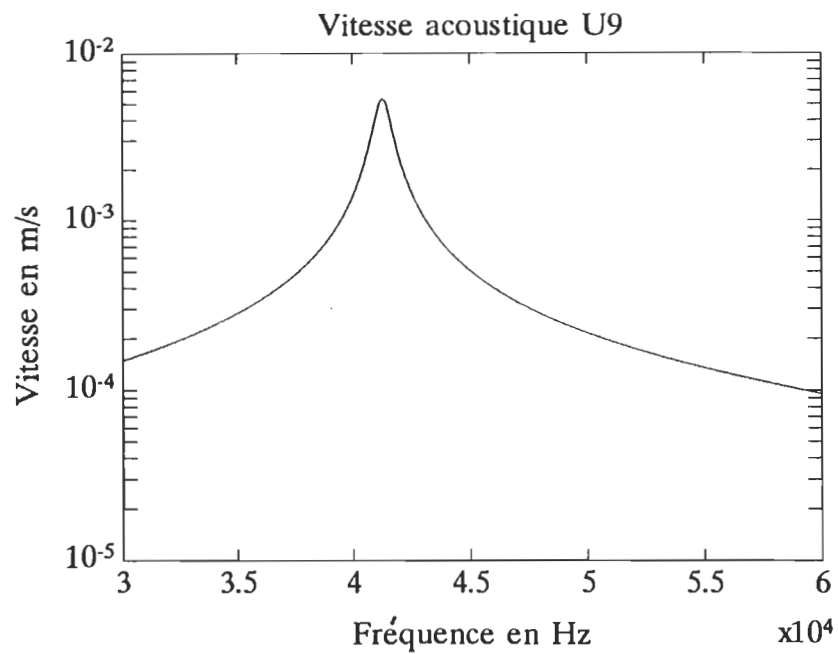


Figure 31 Plusieurs graphiques de la vitesse. Fichier Réson 9.m

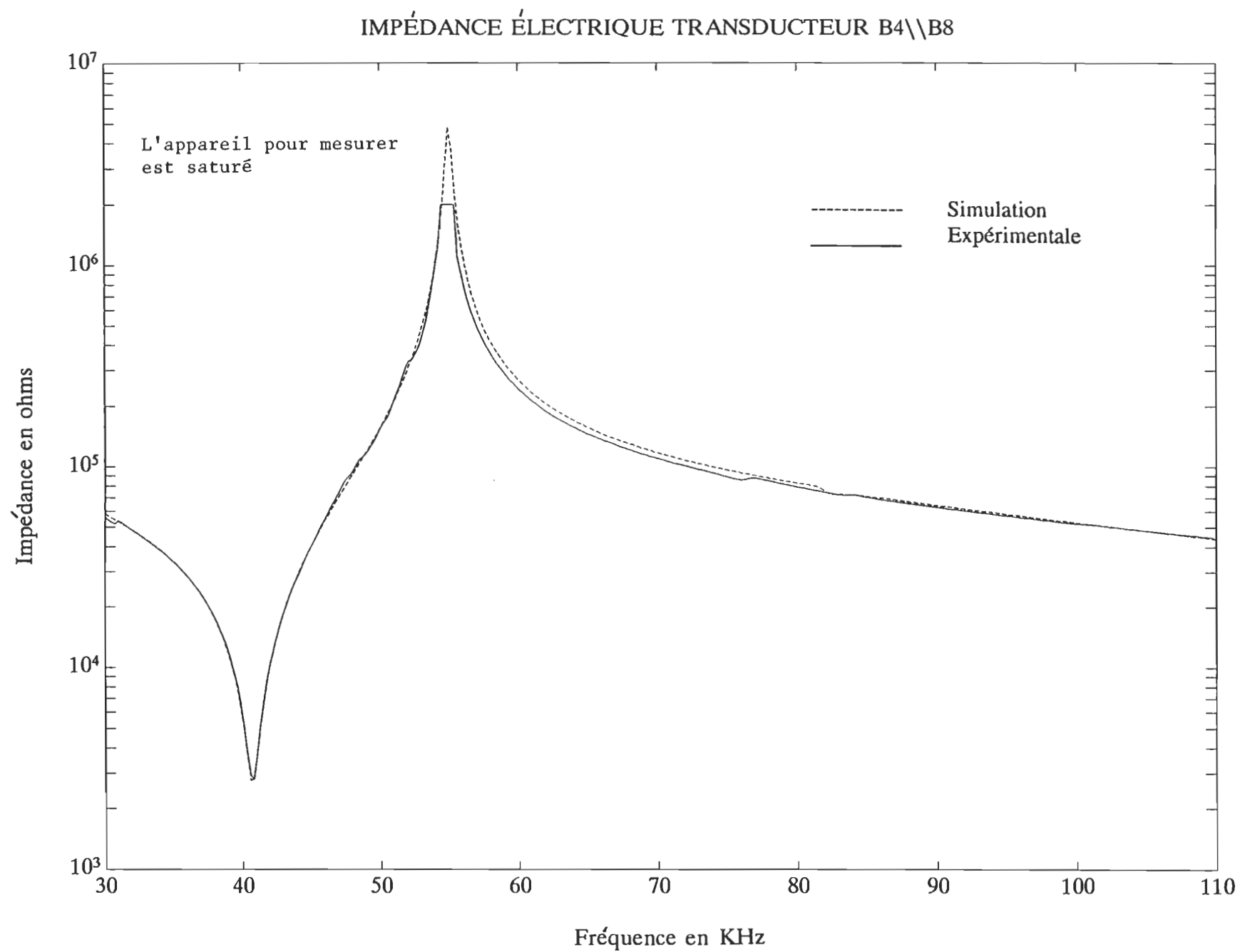


Figure 32 Impédance électrique. Fichier Réson 9.m, tableau 19

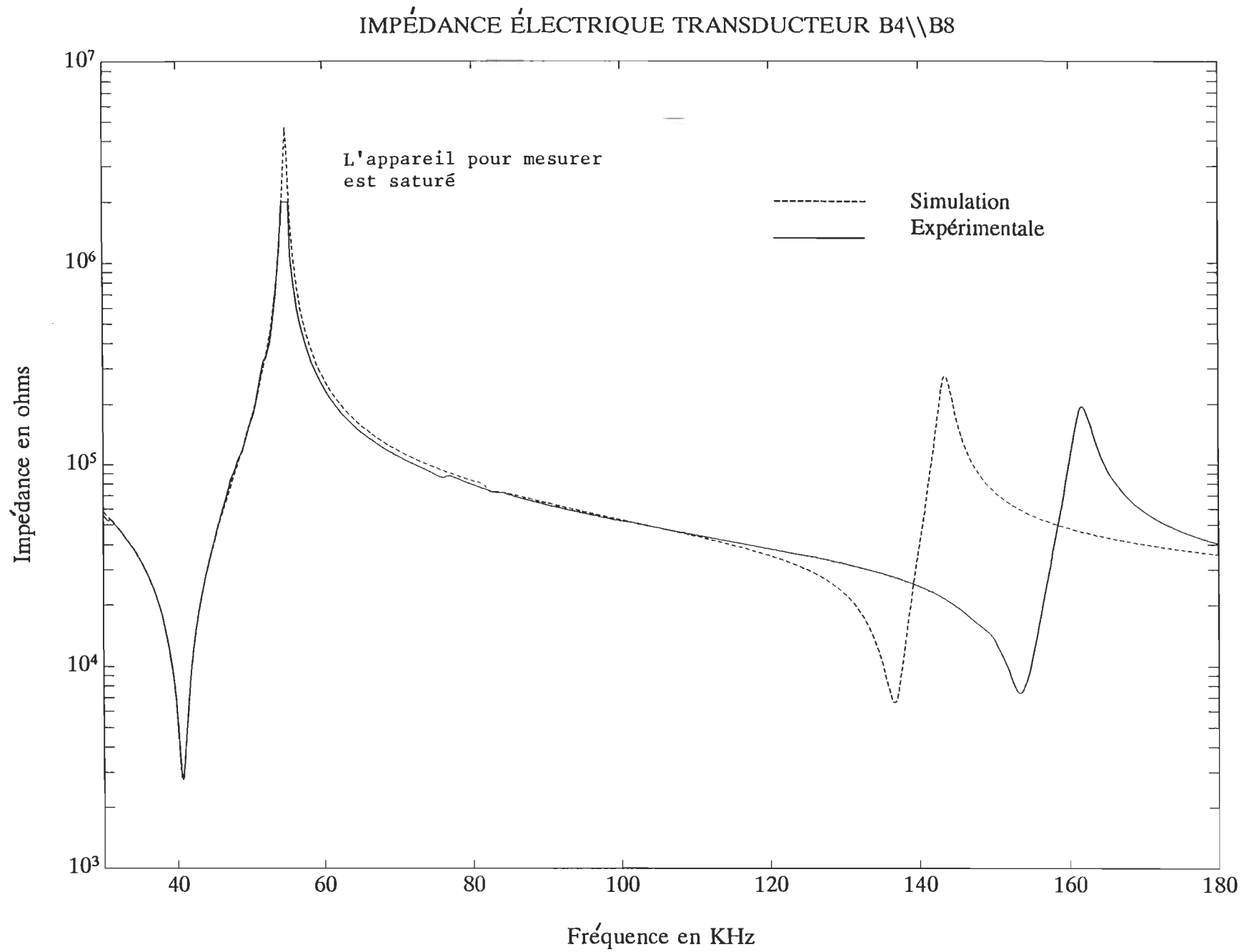


Figure 33 Impédance électrique. Fichier Réson 9.m

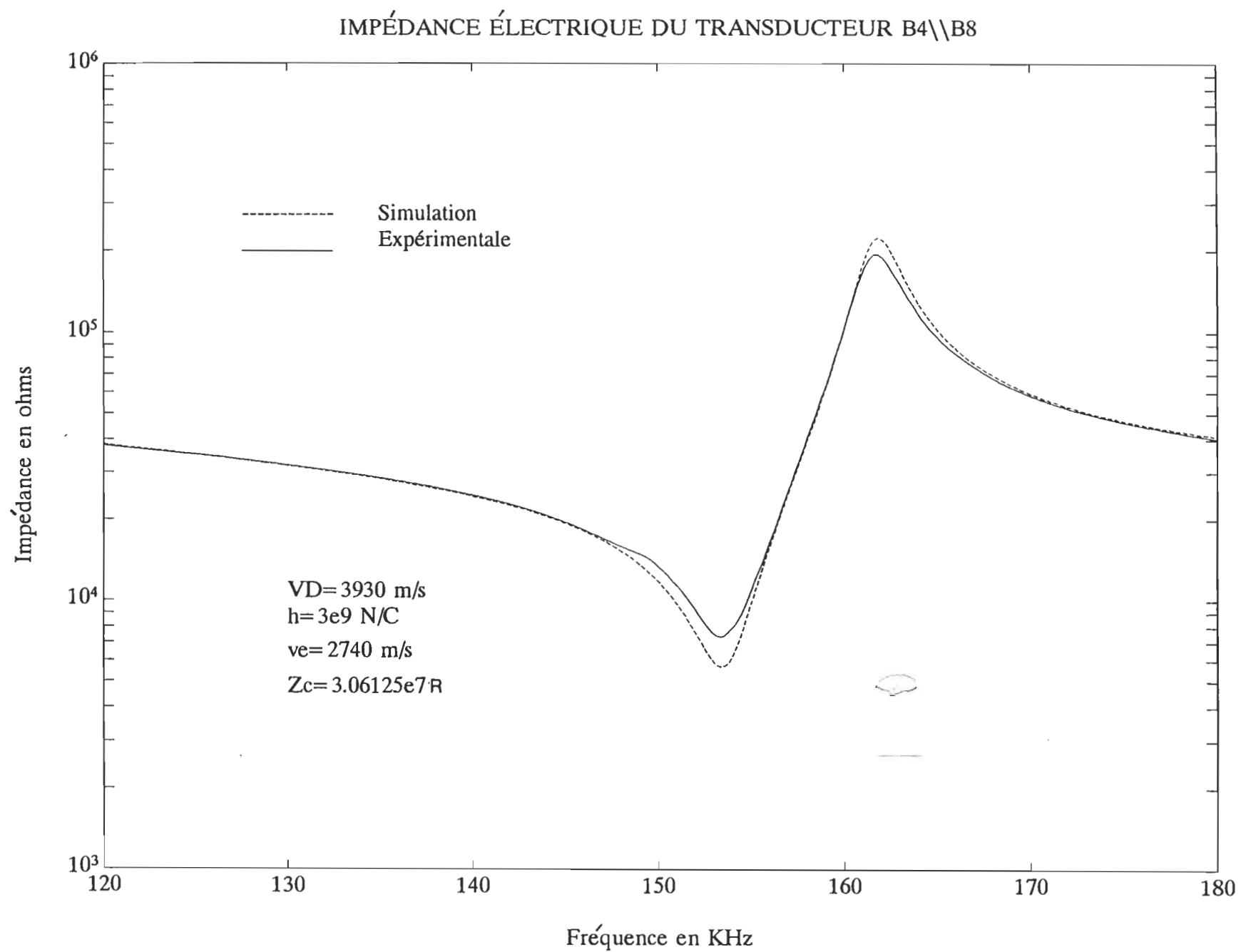


Figure 34 Impédance électrique. Fichier Réson 9.m

ARGUMENT DE L'IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE B4\\B8

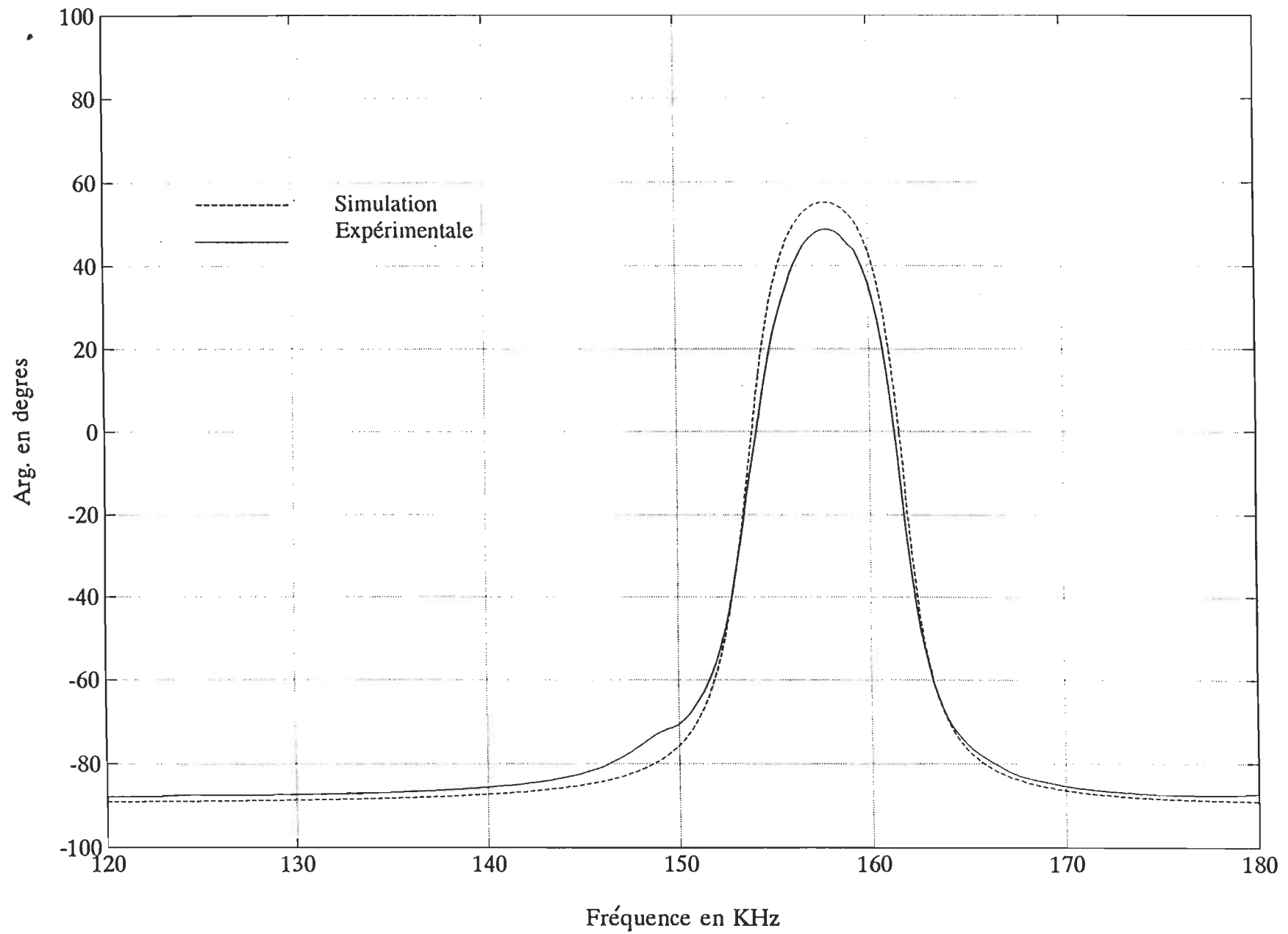


Figure 35 Impédance électrique. Fichier Réson 9.m, tableau 20

4.6 SIMULATION DU TRANSDUCTEUR T14

TABLEAU 21 : FICHIER RÉSON 10.M		
DONNÉES : ÉLÉMENTS PIÉZOÉLECTRIQUES		
Impédance	: 3.2941020 X 10 ⁷ (R)	Remarque : Voir figure 9 de deux éléments piézoélectriques avec quatre milieux à gauche du piézo 1 et quatre milieux à droite du piézo 2.
Épaisseur	: 8.1 mm	
Constante piézoélectrique	: 2.7 X 10 ⁹ N/C	
Surface	: 90 cm ²	
Capacité électrique	: 7.4 nF	
Vitesse V ^D	: 4300 m/s	
Vitesse V ^E	: 3005.24 m/s	
Atténuation	: 2.3 Np/m	
Exposant	: 1.5	
Fréquence de référence	: 100 KHz	
Fréquence inférieure	: 30 KHz	
Fréquence supérieure	: 110 KHz	
Nombre d'intervalles	: 268	
Tension électrique	: 1 Volt	
Remarques : Les deux éléments piézoélectriques sont identiques		

Milieu 5 : 400 R (air)

Milieu 19 : 400 R (air)

TABLEAU 22 : FICHIER RÉSON 10.M DONNÉES : AUTRES MILIEUX				
<u>Milieu 6 (colle)</u>		<u>Milieu 7 (colle)</u>	<u>Milieu 8 (laiton)</u>	<u>Milieu 9 (colle)</u>
Impédance : 4.042 X 10 ⁷ R		1.56 X 10 ⁶ R	4.042 X 10 ⁷ R	1.56 X 10 ⁶ R
Épaisseur : 3.12 mm		0.012 mm	0.075 mm	0.012 mm
Vitesse : 470 m/s		1300 m/s	4700 m/s	1300 m/s
Atténuation : 2 Np/m		25 Np/m	2 Np/m	25 Np/m
Exposant : 1.5		4.5	1.5	1.5
<u>Milieu 11 (colle)</u>		<u>Milieu 12 (acier)</u>	<u>Milieu 13 (colle)</u>	
Impédance : 1.56 X 10 ⁶ R		4.582 X 10 ⁷ R	1.56 X 10 ⁶ R	
Épaisseur : 0.012 mm		1.3 mm	0.012 mm	
Vitesse : 1300 m/s		5800 m/s	1300 m/s	
Atténuation : 25 Np/m		1.8 Np/m	25 Np/m	
Exposant : 1.5		1.5	1.5	
<u>Milieu 15 (colle)</u>		<u>Milieu 16 (laiton)</u>	<u>Milieu 17 (colle)</u>	<u>Milieu 18 (laiton)</u>
Impédance : 1.56 X 10 ⁶ R		4.042 X 10 ⁷ R	1.56 X 10 ⁶ R	4.042 X 10 ⁷ R
Épaisseur : 0.012 mm		0.075 mm	0.012 mm	1.56 mm
Vitesse : 1300 m/s		4700 m/s	1300 m/s	4700 m/s
Atténuation : 25 Np/m		2 Np/m	25 Np/m	2 Np/m
Exposant : 1.5		1.5	1.5	1.5

TABLEAU 23 : FICHIER RÉSON 10.M RÉSULTATS MAX-MIN $ Z $ (ohms) DU TRANSDUCTEUR			
f(KHz)	Simulation Max.	f(KHz)	Mesure Max.
30	223.03	30	219.9
80.15	972.08	80.4	667.2
f(KHz)	Simulation Min.	f(KHz)	Mesure Min.
68.2	20.24	68.4	17.3
110	100.83	110	113.0

TABLEAU 24 : FICHIER RÉSON 10.M RÉSULTATS ARGUMENTS DE L'IMPÉDANCE EN DEGRÉS (dg)			
f(KHz)	Simulation (dg).	f(KHz)	Mesure (dg)
30	-89.35	30	-89.47
80.15	-10.55	80.4	-6.27
68.2	-26.12	68.4	-17.02

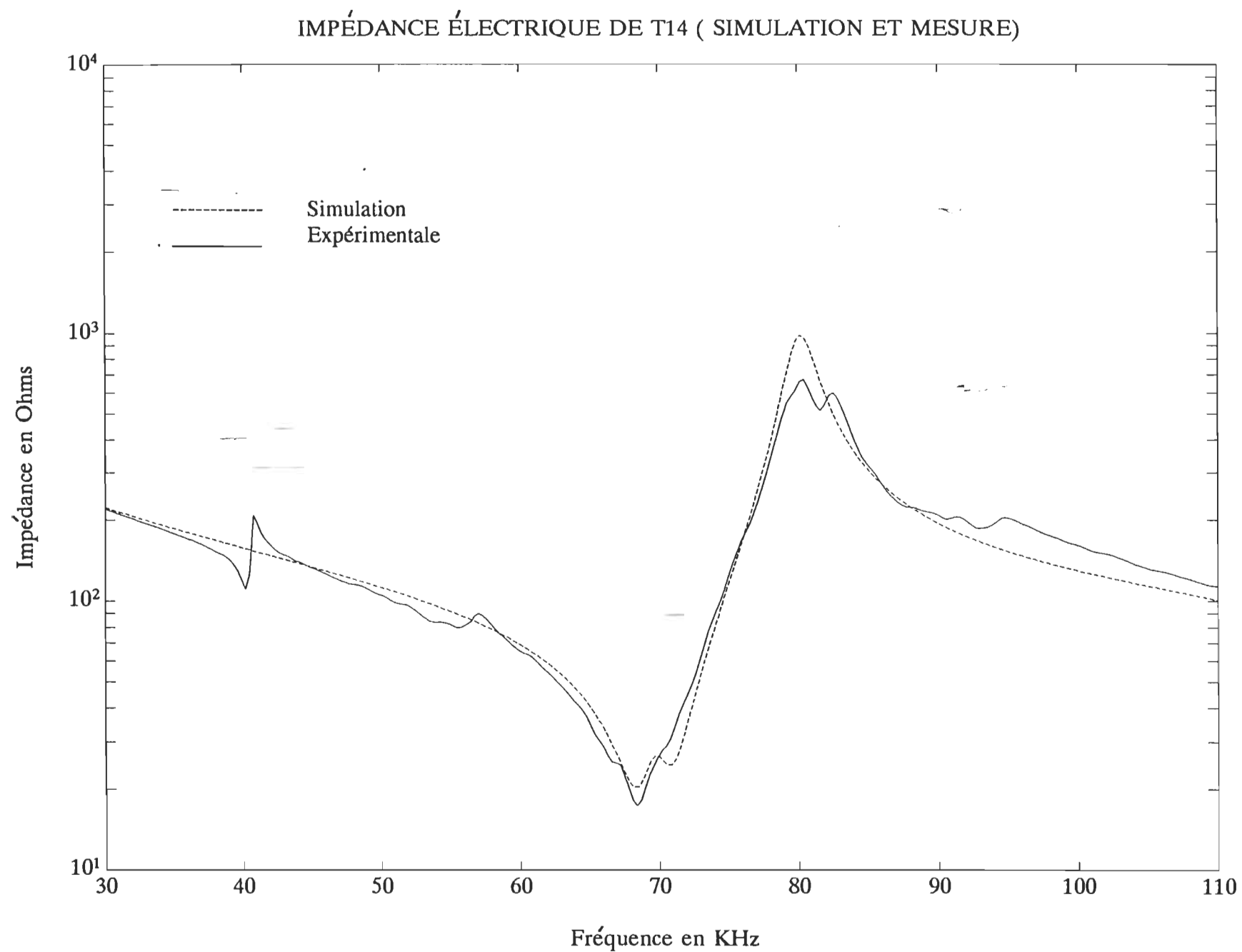


Figure 36 Impédance électrique. Fichier Réson 10.m, tableau 23

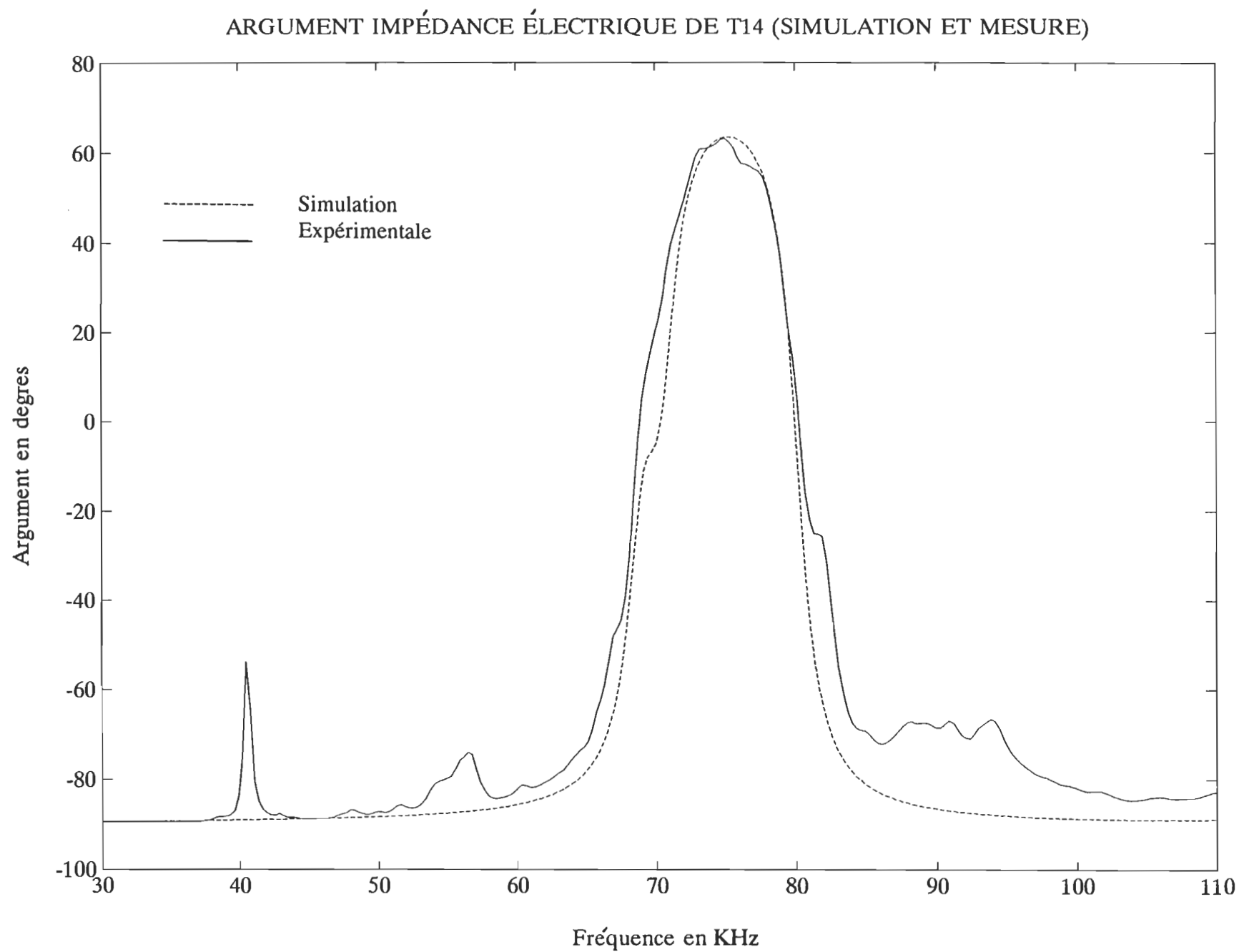


Figure 37 Argument de l'impédance électrique de T14. Fichier Réson 10.m, tableau 24

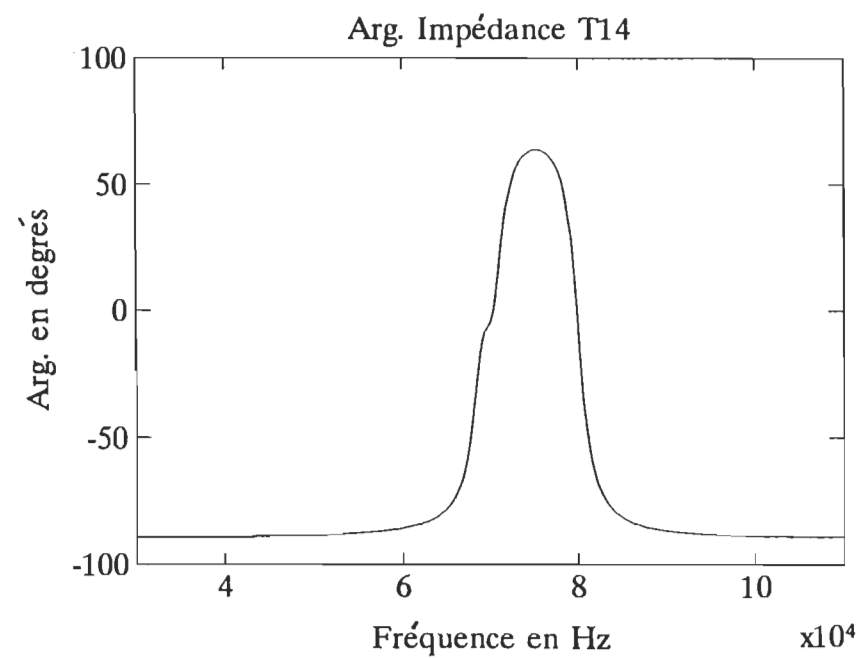
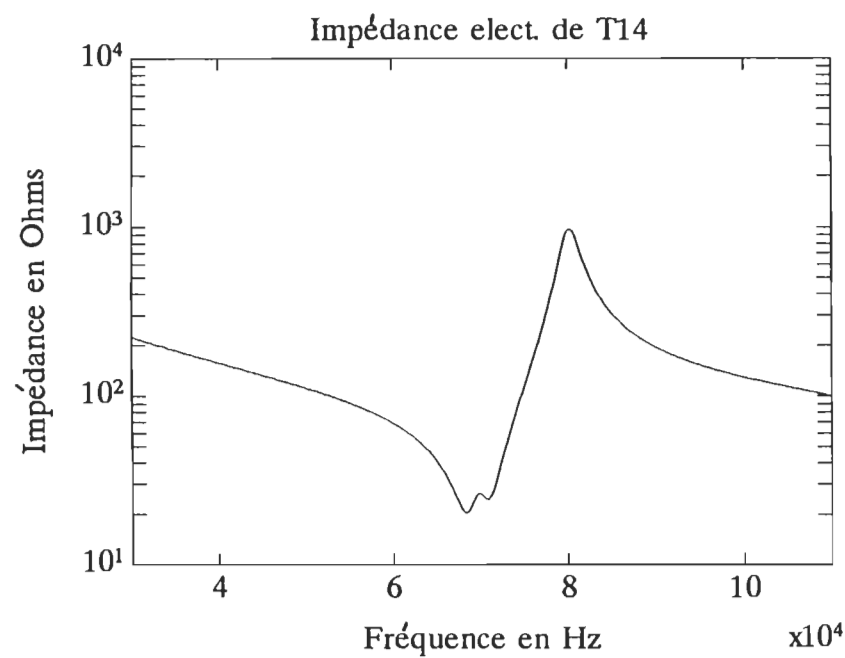
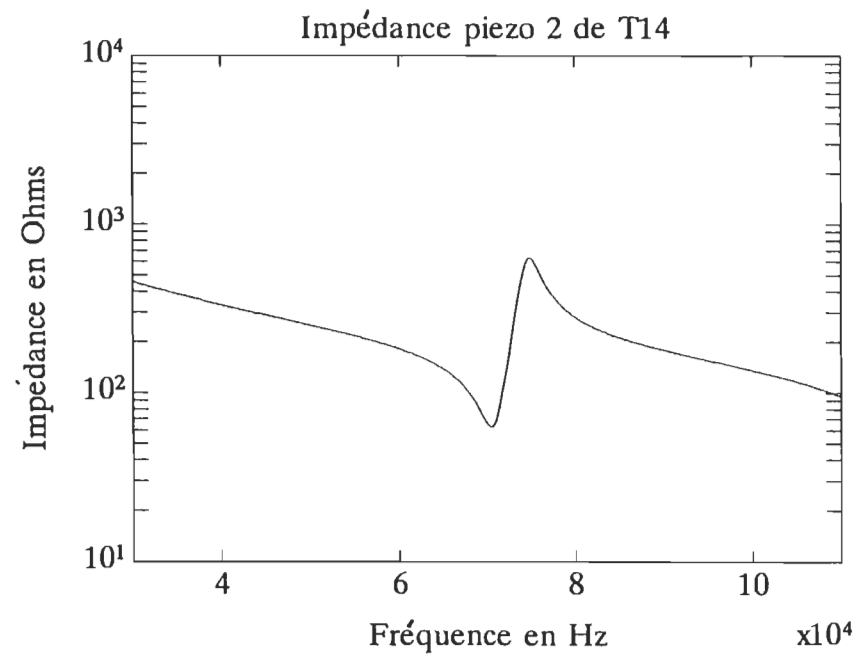
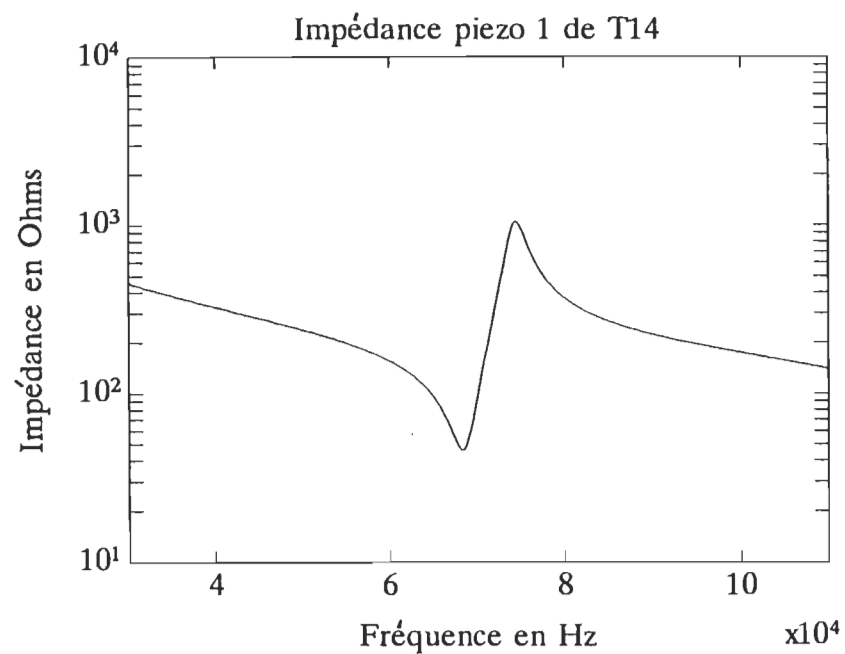


Figure 38 Plusieurs graphiques. Fichier Réson 10.m, tableaux 23 et 24

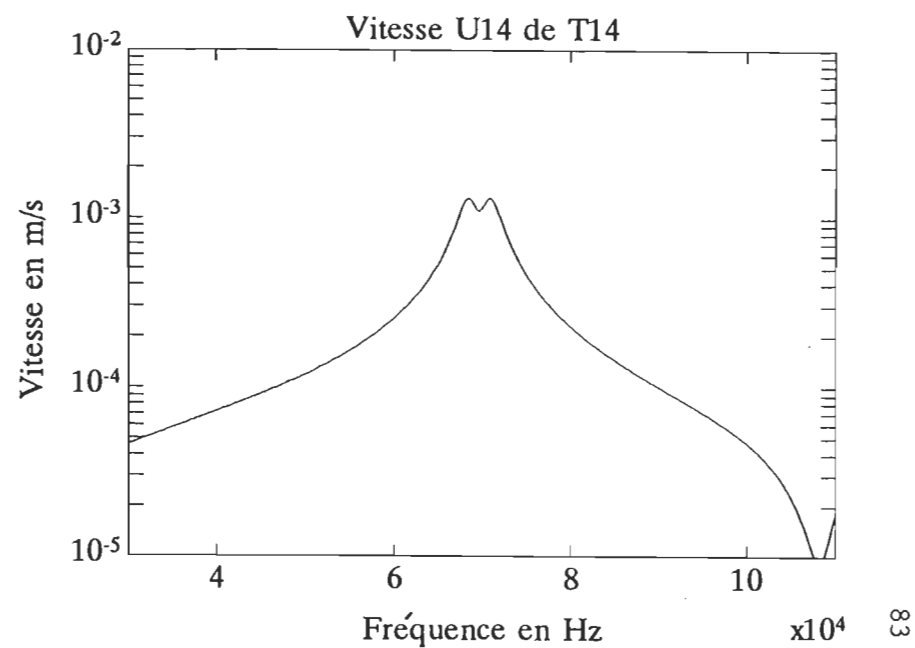
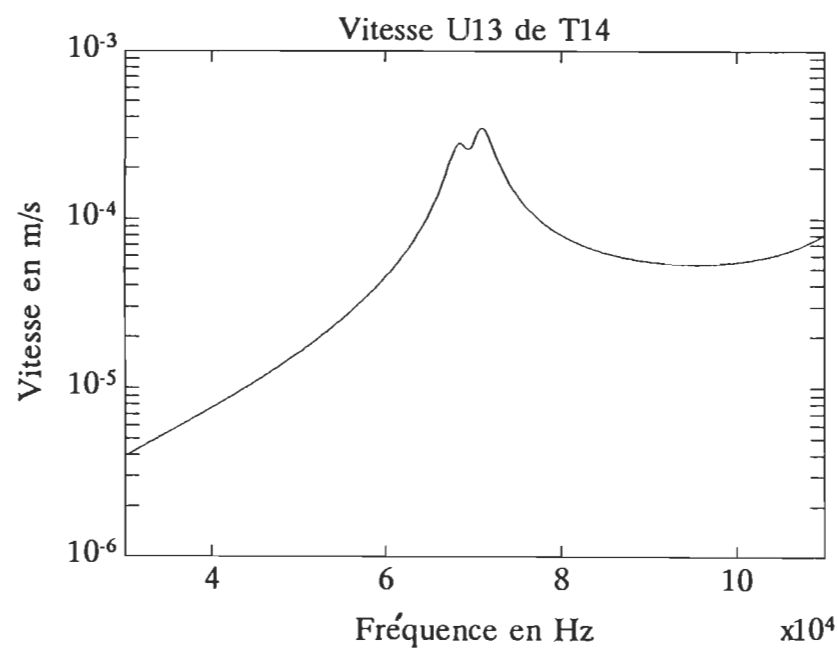
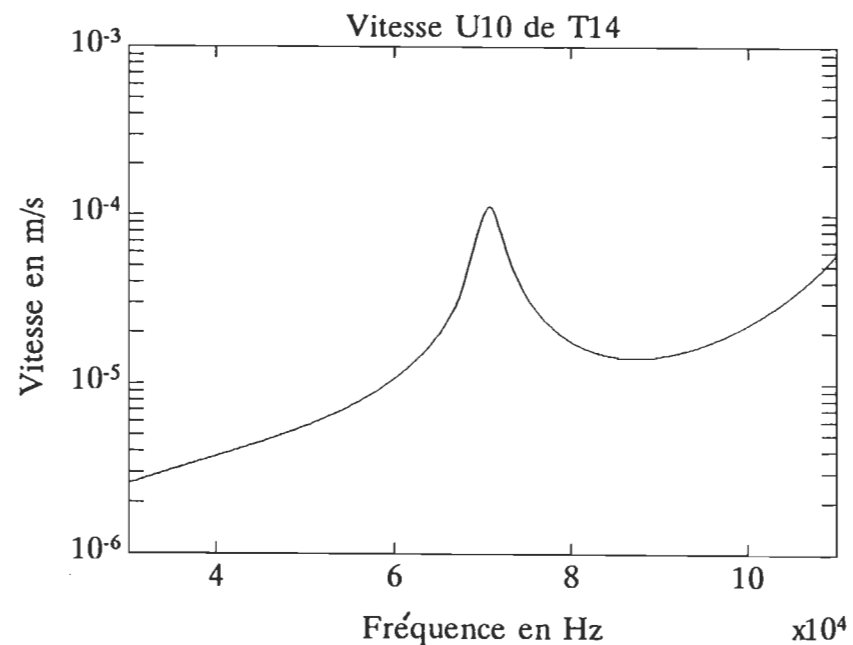
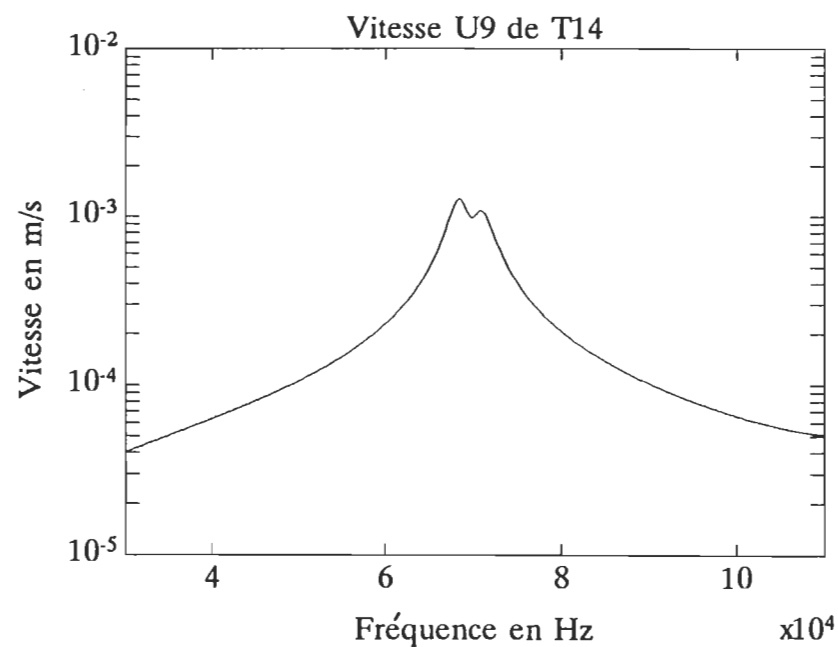


Figure 39 Plusieurs graphiques de la vitesse. Fichier Réson 10.m

IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE TRANSDUCTEUR T14

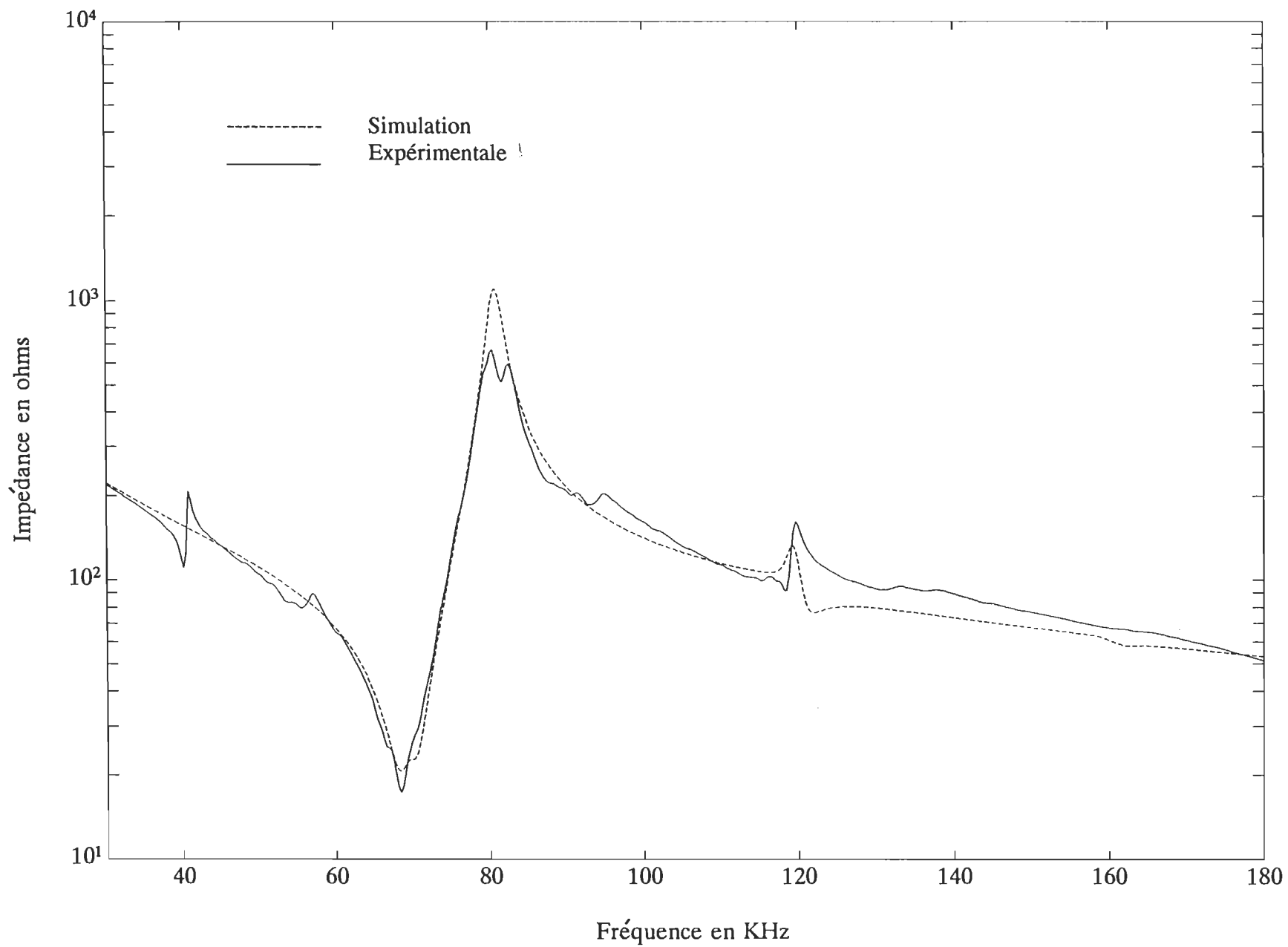


Figure 40 Impédance électrique. Fichier Réson 10.m, tableau 23

ARGUMENT DE L'IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE TRANSDUCTEUR T14

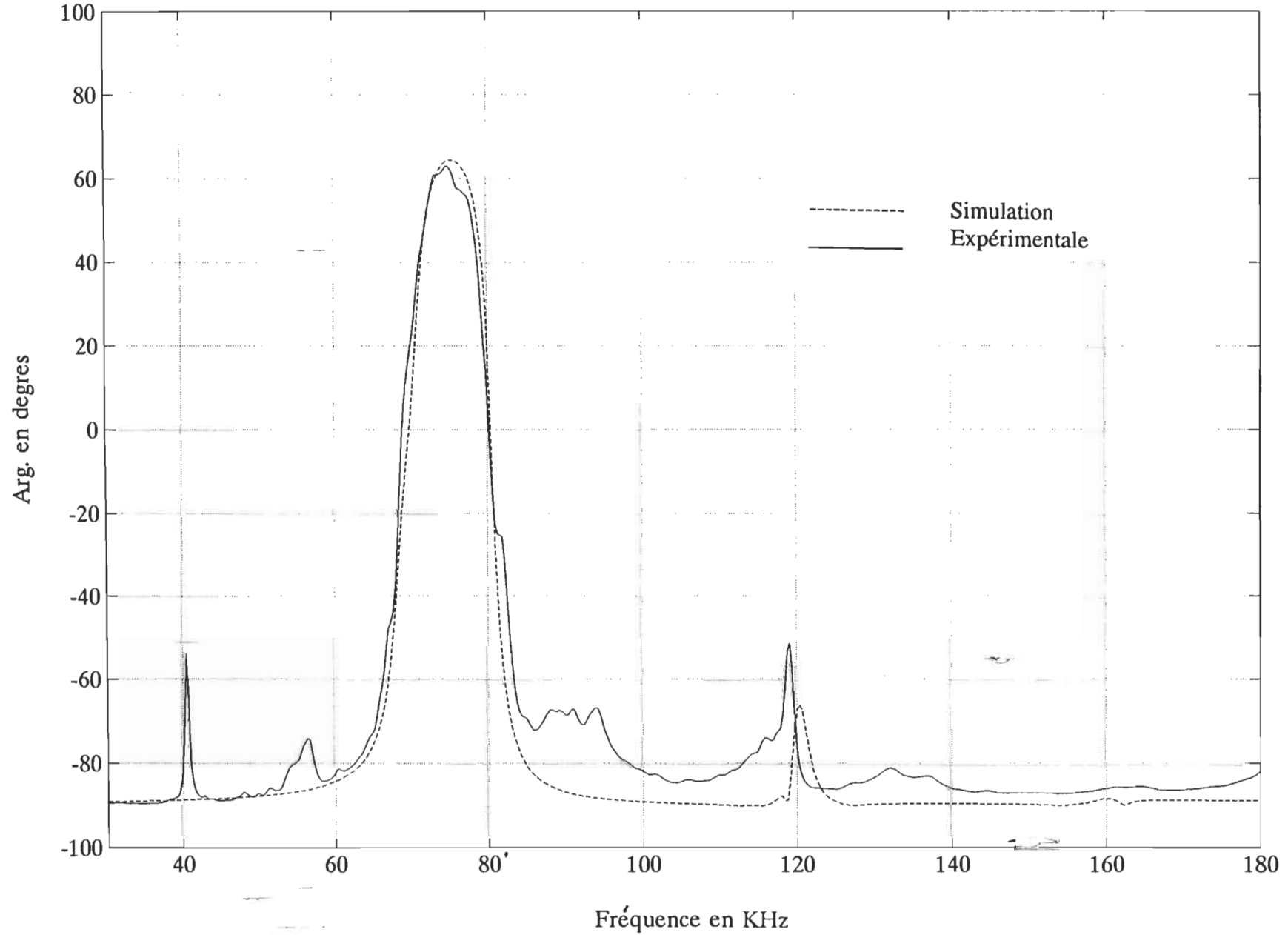


Figure 41 Argument de l'impédance électrique. Fichier Réson 10.m, tableau 24

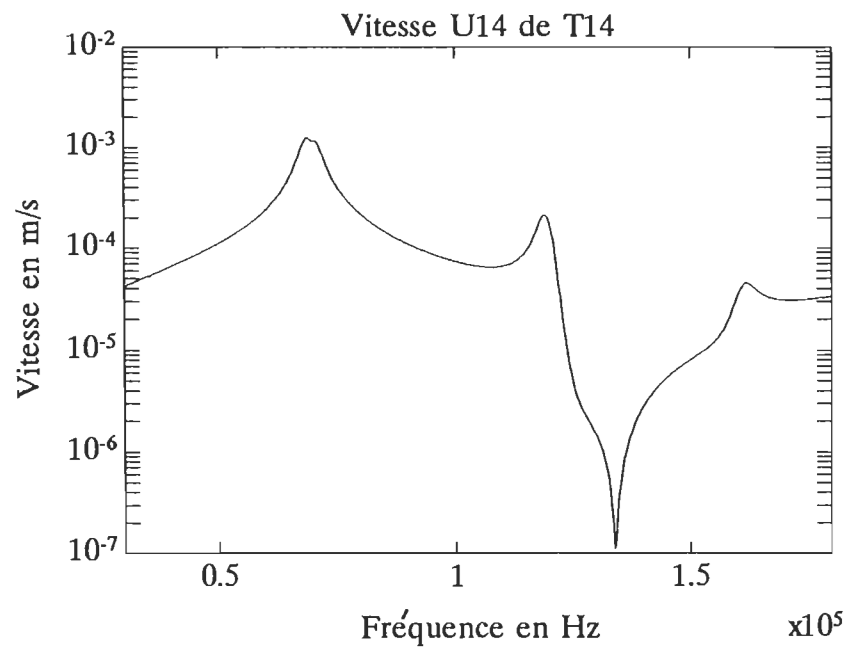
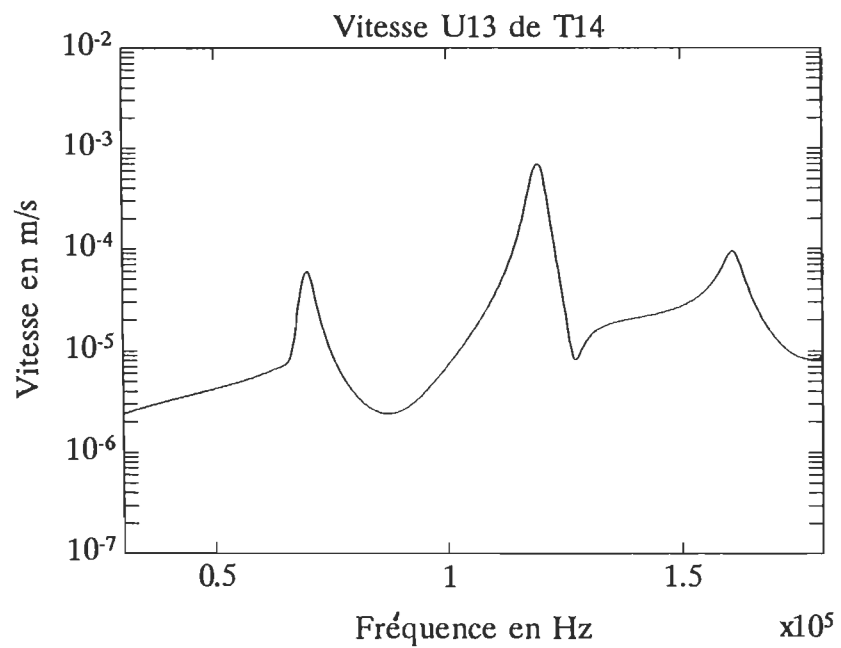
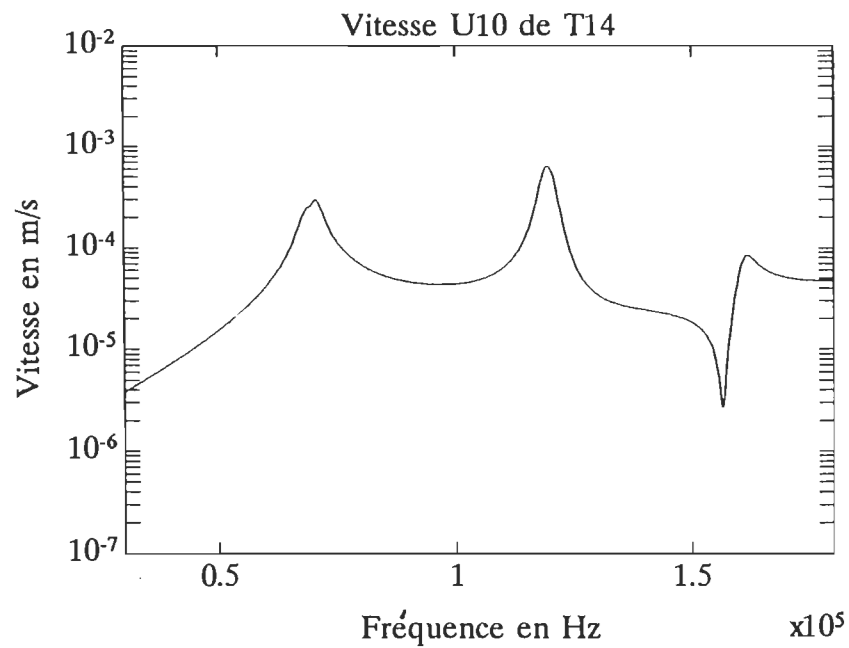
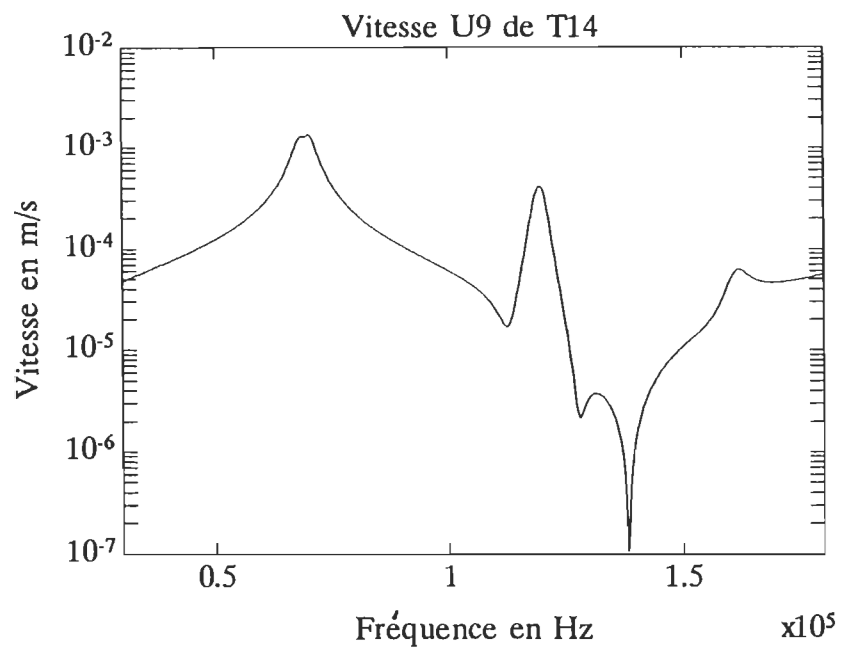


Figure 42 Plusieurs graphiques de la vitesse. Fichier Réson 10.m

4.7 SIMULATION DU TRANSDUCTEUR T14 (AIR-EAU)

TABLEAU 25 : FICHIER RÉSON 4.M
DONNÉES : ÉLÉMENTS PIÉZOÉLECTRIQUES

Impédance	:	3.2941020 X 10 ⁷ (R)
Épaisseur	:	8.1 mm
Constante piézoélectrique	:	2.7 X 10 ⁹ N/C
Surface	:	90 cm ²
Capacité électrique	:	7.4 nF
Vitesse V ^D	:	4300 m/s
Vitesse V ^E	:	3005.24 m/s
Atténuation	:	2.3 Np/m
Exposant	:	1.5
Fréquence de référence	:	100 KHz
Fréquence inférieure	:	30 KHz
Fréquence supérieure	:	180 KHz
Nombre d'intervalles	:	500
Tension électrique	:	1 Volt

Remarques : Les deux éléments piézoélectriques sont identiques pour la simulation.

Milieu 5	:	400 R (air)
Milieu 17	:	400 R (air)

TABLEAU 26 : FICHIER RÉSON 4.M DONNÉES : AUTRES MILIEUX			
<u>Milieu 6 (laiton)</u>	<u>Milieu 7 (colle)</u>	<u>Milieu 8 (laiton)</u>	<u>Milieu 9 (colle)</u>
Impédance : $4.042 \times 10^7 R$	$1.56 \times 10^6 R$	$4.042 \times 10^7 R$	$1.56 \times 10^6 R$
Épaisseur : 1.56 mm	0.012 mm	0.075 mm	0.012 mm
Vitesse : 4700 m/s	1300 m/s	4700 m/s	1300 m/s
Atténuation : 2	25 Np/m	2 Np/m	25 Np/m
Exposant : 1.5	1.5	1.5	1.5
<u>Milieu 11 (colle)</u>	<u>Milieu 12 (acier)</u>	<u>Milieu 13 (colle)</u>	<u>Milieu 15 (colle)</u>
Impédance : $1.5 \times 10^6 R$	$4.582 \times 10^7 R$	$1.5 \times 10^6 R$	$1.56 \times 10^6 R$
Épaisseur : 0.012 mm	1.3 mm	0.012 mm	0.012 mm
Vitesse : 1300 m/s	5800 m/s	1300 m/s	1300 m/s
Atténuation : 25 Np/m	1.8 Np/m	25 Np/m	25 Np/m
Exposant : 1.5	1.5	1.5	1.5
<u>Milieu 16 (laiton)</u>			
Impédance : $4.042 \times 10^7 R$			
Épaisseur : 3.12 mm			
Vitesse : 4700 m/s			
Atténuation : 2 Np/m			
Exposant : 1.5			

TABLEAU 27 : FICHIER RÉSON 4.M RÉSULTATS MAX-MIN Z (OHMS) DU TRANSDUCTEUR	
f(KHz)	Simulation Max.
30	223.16
80.7	454.86
118.5	115.95
126	78.56
f(KHz)	Simulation Min.
69.3	32.77
114.6	106.88
123	77.64
180	52.06

TABLEAU 28 : FICHIER RÉSON 4.M RÉSULTATS ARGUMENTS DE L'IMPÉDANCE EN DEGRÉS	
f(KHz)	Simulation (Max. de l'Impédance)
30	-89.0339
80.7	-22.9203
118.5	-85.4095
126	-89.2408
f(KHz)	Simulation (Min. de l'Impédance)
69.3	-23.5864
114.6	-87.9105
123	-85.7253
180	-89.0219

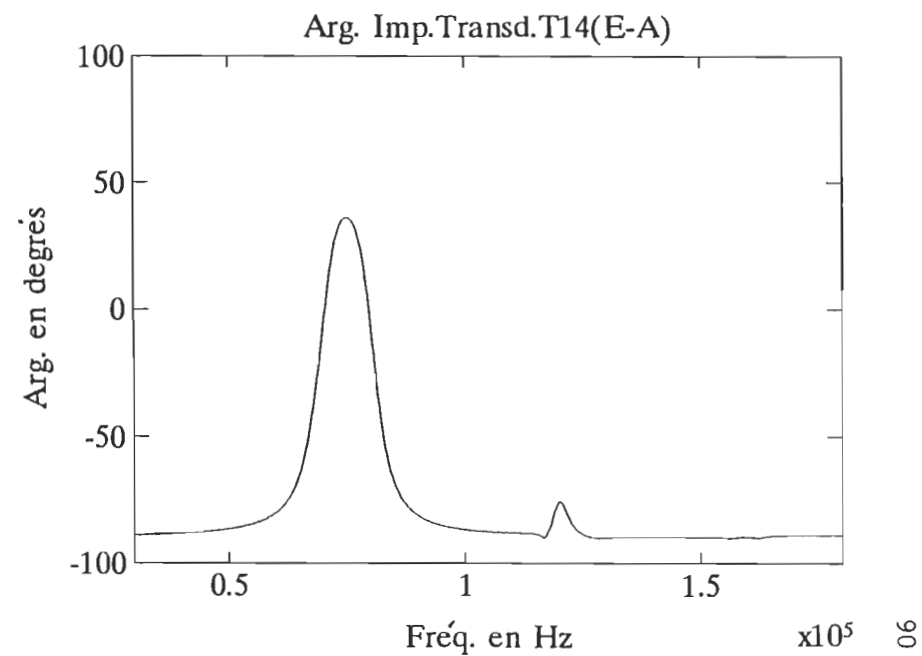
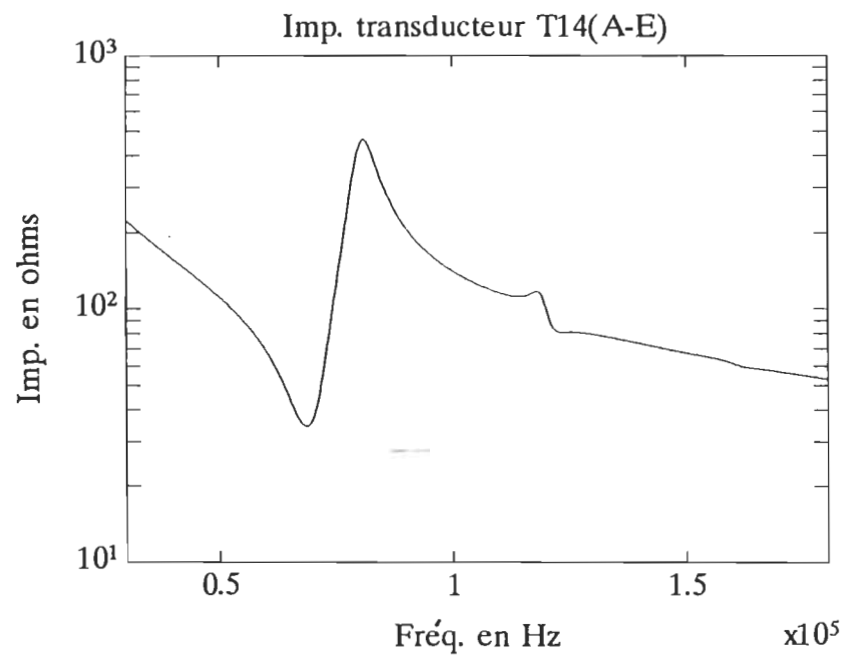
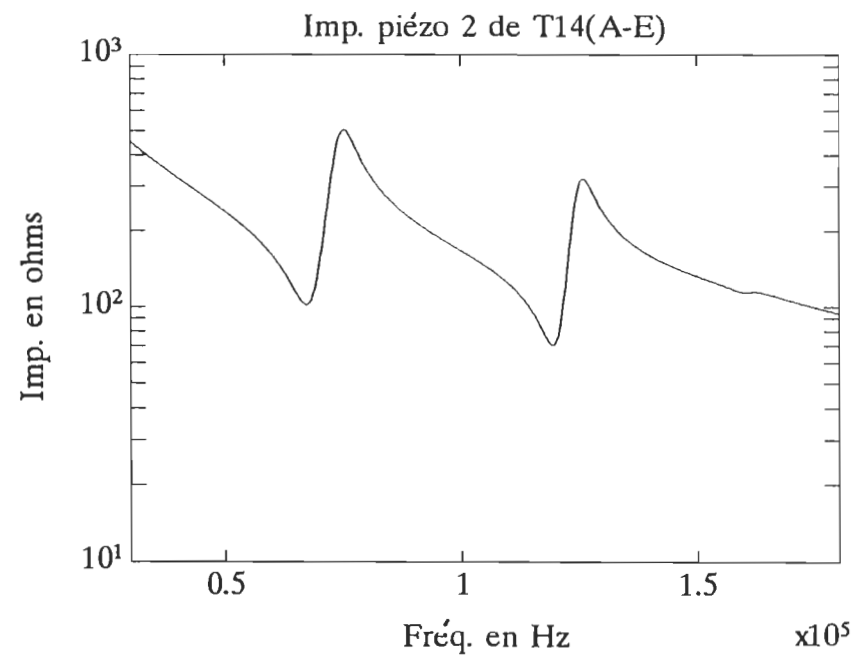
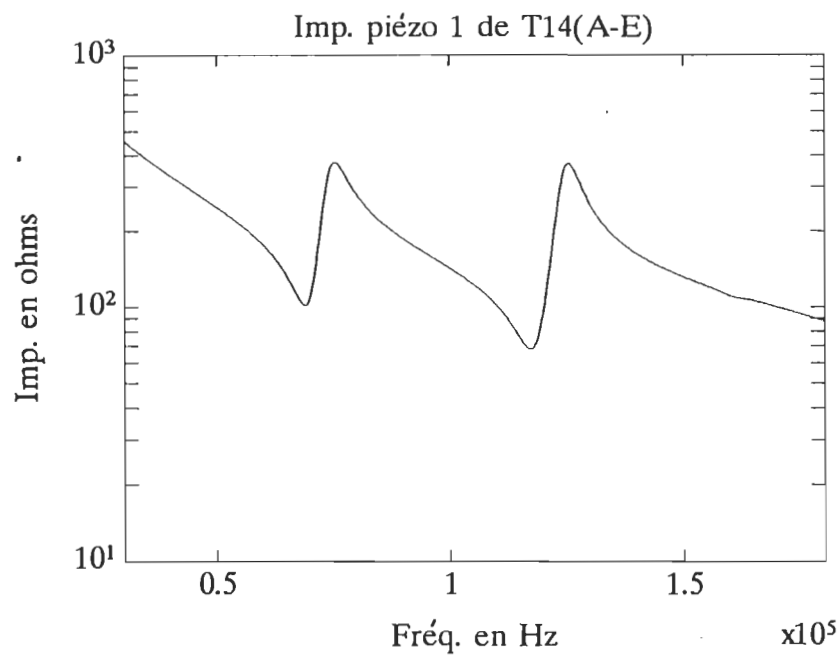


Figure 43 Plusieurs graphiques. Fichier Réson 4.m, tableaux 27 et 28

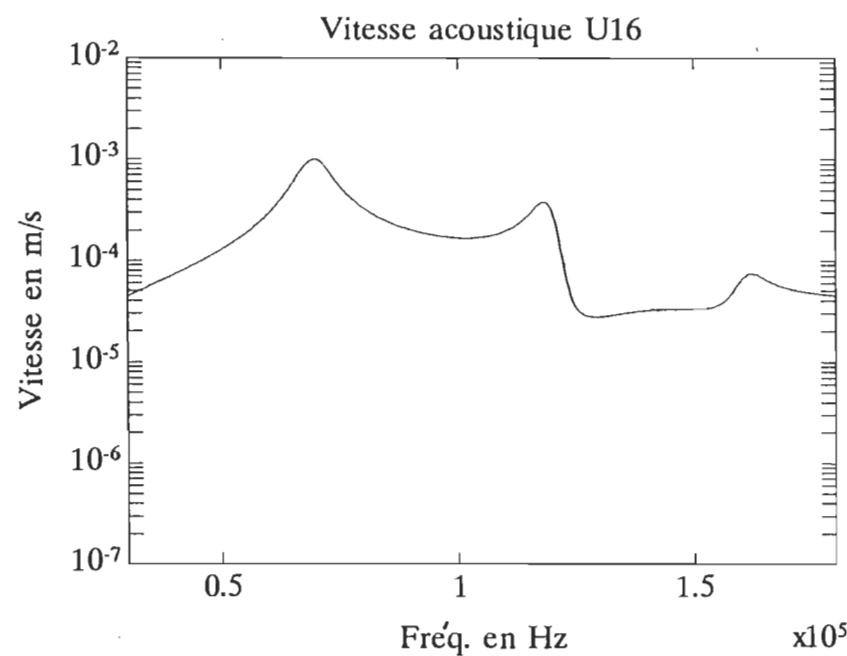
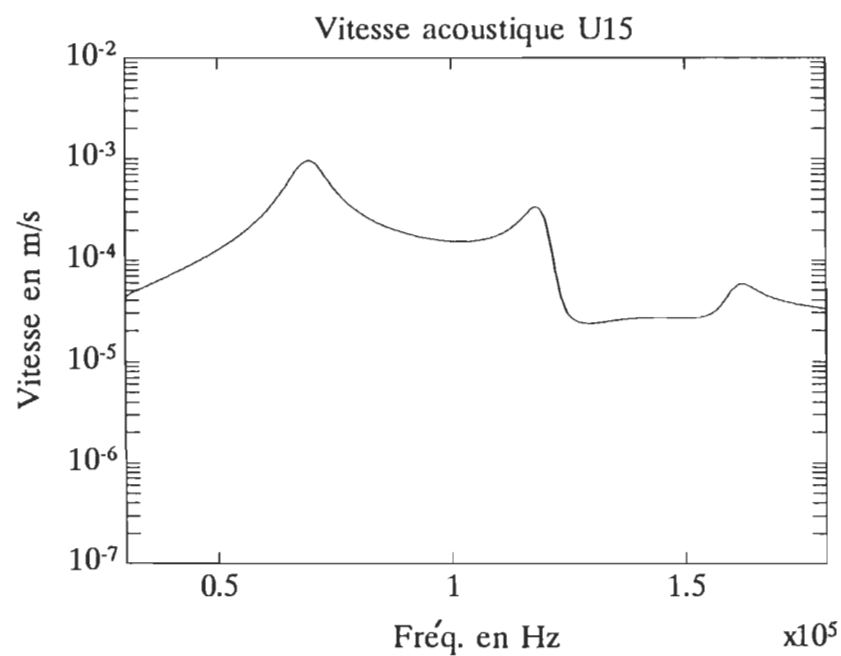
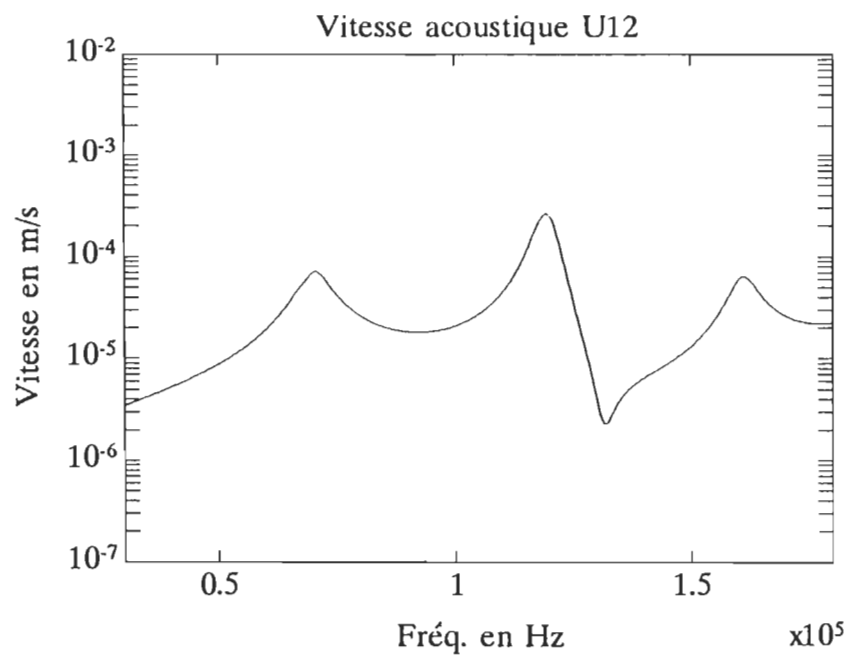
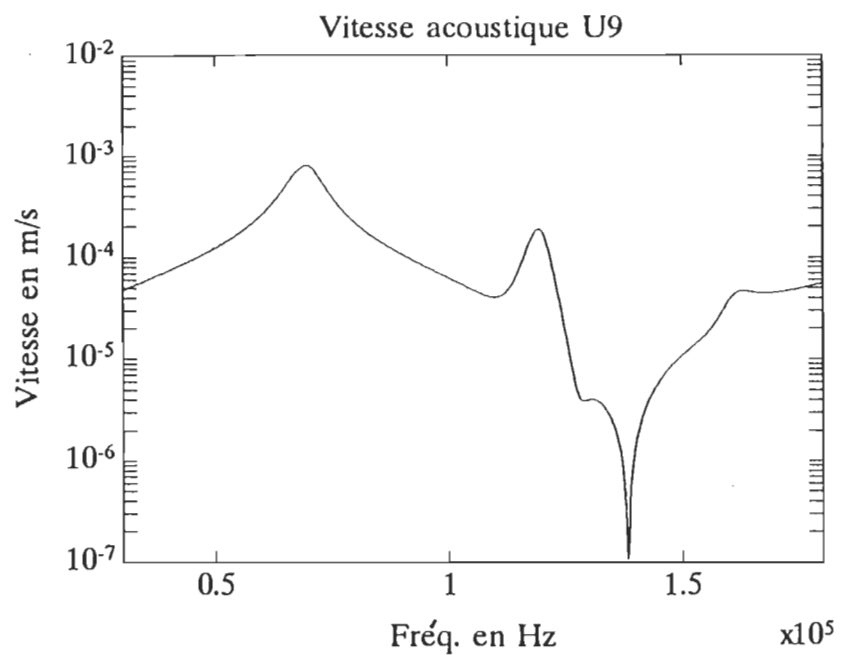


Figure 44 Plusieurs graphiques de la vitesse. Fichier Réson 4.m

4.8 SIMULATION RÉSONATEUR (T14-T14 EN PARALLÈLE ÉLECTRIQUEMENT ET EN SÉRIE MÉCANIQUEMENT)

TABLEAU 29 : FICHER RÉSONA 1.M		
DONNÉES :		ÉLÉMENTS PIÉZOÉLECTRIQUES
Impédance	:	3.294102 X 10 ⁷ (R)
Épaisseur	:	8.1 mm
Constante piézoélectrique	:	2.7 X 10 ⁹ N/C
Surface	:	90 cm ²
Capacité électrique	:	7.4 nF
Vitesse V ^D	:	4300 m/s
Vitesse V ^E	:	3005.24 m/s
Atténuation	:	2.3 Np/m
Exposant	:	1.5
Fréquence de référence	:	100 KHz
Fréquence inférieure	:	50 KHz
Fréquence supérieure	:	150 KHz
Nombre d'intervalles	:	200
Tension électrique	:	1 Volt
Remarques : Les quatre éléments piézoélectriques sont identiques pour la simulation.		

Milieu 5 : 400 R (air)

Milieu 29 : 400 R (air)

Remarque : Les deux transducteurs piézoélectriques sont identiques pour la simulation.

TABLEAU 30 : FICHER RÉSONA 1.M
DONNÉES : AUTRES MILIEUX

<u>Milieu 6 (laiton)</u>	<u>Milieu 7 (colle)</u>	<u>Milieu 8 (laiton)</u>
Impédance : $4.042 \times 10^7 R$	$1.56 \times 10^6 R$	$4.042 \times 10^7 R$
Épaisseur : 4.56 mm	0.012 mm	0.075 mm
Vitesse : 4700 m/s	1300 m/s	4700 m/s
Atténuation : 2 Np/m	25 Np/m	2 Np/m
Exposant : 1.5	1.5	1.5
<u>Milieu 9 (colle)</u>	<u>Milieu 11 (colle)</u>	<u>Milieu 12 (acier)</u>
Impédance : $1.56 \times 10^6 R$	$1.5 \times 10^6 R$	$4.582 \times 10^7 R$
Épaisseur : 0.012 mm	0.012 mm	1.3 mm
Vitesse : 1300 m/s	1300 Np/m	5800 m/s
Atténuation : 25 Np/m	25 Np/m	1.8 Np/m
Exposant : 1.5	1.5	1.5
<u>Milieu 13 (colle)</u>	<u>Milieu 15 (colle)</u>	<u>Milieu 16 (laiton)</u>
Impédance : $1.5 \times 10^6 R$	$1.56 \times 10^6 R$	$4.042 \times 10^7 R$
Épaisseur : 0.012 mm	0.012 mm	3.12 mm
Vitesse : 1300 m/s	1300 Np/m	4700 m/s
Atténuation : 25 Np/m	25 Np/m	2 Np/m
Exposant : 1.5	1.5	1.5
<u>Milieu 17 (eau)</u>	<u>Milieu 18 (laiton)</u>	<u>Milieu 19 (colle)</u>
Impédance : $1.5 \times 10^6 R$	$4.042 \times 10^7 R$	$1.56 \times 10^6 R$
Épaisseur : 32.6086 mm	3.12 mm	0.012 mm
Vitesse : 1500 m/s	4700 m/s	1300 m/s
Atténuation : 0.1 Np/m	2 Np/m	25 Np/m
Exposant : 2	1.5	1.5
<u>Milieu 21 (colle)</u>	<u>Milieu 22 (acier)</u>	<u>Milieu 23 (colle)</u>
Impédance : $1.56 \times 10^6 R$	$4.582 \times 10^7 R$	$1.5 \times 10^6 R$
Épaisseur : 0.012 mm	1.3 mm	0.012 mm
Vitesse : 1300 m/s	5800 m/s	1300 m/s
Atténuation : 25 Np/m	1.8 Np/m	25 Np/m
Exposant : 1.5	1.5	1.5
<u>Milieu 25 (colle)</u>	<u>Milieu 26 (laiton)</u>	<u>Milieu 27 (colle)</u>
Impédance : $1.56 \times 10^6 R$	$4.042 \times 10^7 R$	$1.56 \times 10^6 R$
Épaisseur : 0.012 mm	0.075 mm	0.012 mm
Vitesse : 1300 m/s	4700 m/s	1300 m/s
Atténuation : 25 Np/m	2 Np/m	25 Np/m
Exposant : 1.5	1.5	1.5
<u>Milieu 28 (laiton)</u>		
Impédance : $4.042 \times 10^7 R$		
Épaisseur : 1.56 mm		
Vitesse : 4700 m/s		
Atténuation : 2 Np/m		
Exposant : 1.5		

TABLEAU 31 : FICHIER RÉSONA 1.M RÉSULTATS MAX-MIN DE $ Z $ (ohms) DU RÉSONATEUR	
f(KHz)	Simulation (Max. de l'impédance)
50	59.76198
72	91.71713
79.5	534.0815
93	269.0197
113.5	52.50175
118	67.75321
121	53.50241
127	40.04402
138.5	40.03591
139.5	37.11623
f(KHz)	Simulation (Min. de l'impédance)
68	8.209547
73.5	23.26423
92	15.66114
113	52.2766
116.5	50.89241
119.5	49.70217
123	37.80786
138	34.49438
139	36.99471
150	33.87160

TABLEAU 32 : FICHIER RÉSONA 1.M RÉSULTATS ARGUMENTS DE L'IMPÉDANCE EN DEGRÉS	
f(KHz)	Simulation (Max. de l'impédance)
50	-88.1464
72	5.6485
79.5	-3.7681
93	23.9320
113.5	-89.9669
118	-86.7193
121	-77.6058
127	-89.9921
138.5	-67.6953
139.5	-89.3671
f(KHz)	Simulation (Min. de l'impédance)
68	-18.3668
73.5	20.9409
92	-48.7934
113	-89.2840
116.5	-86.6457
119.5	-82.3879
123	-28.3292
138	-87.8663
139	-67.6953
150	-89.8379

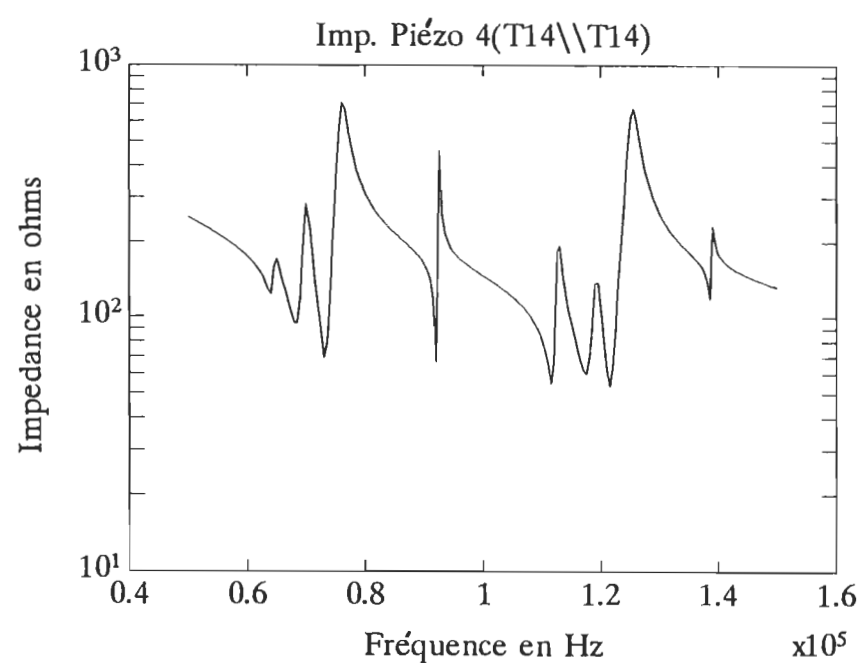
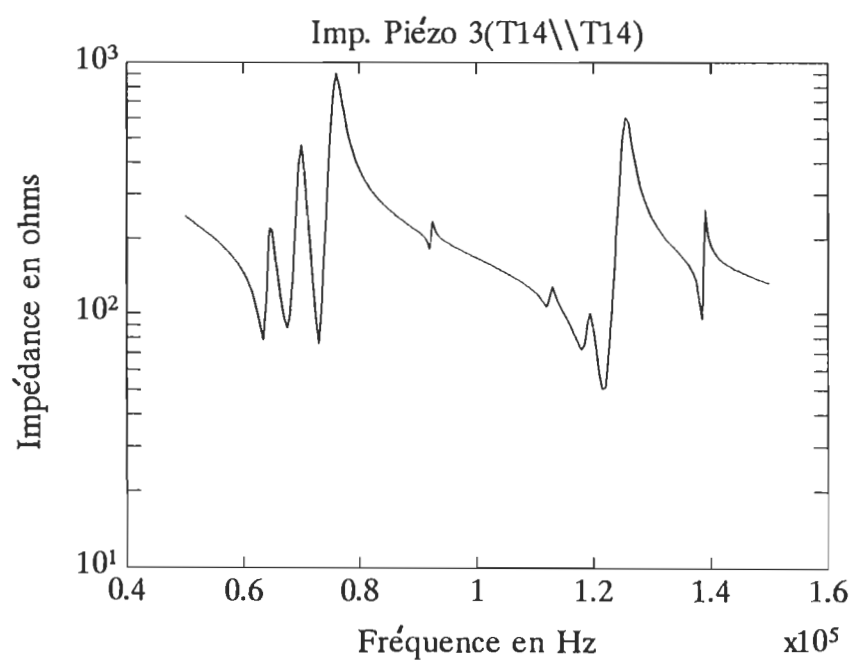
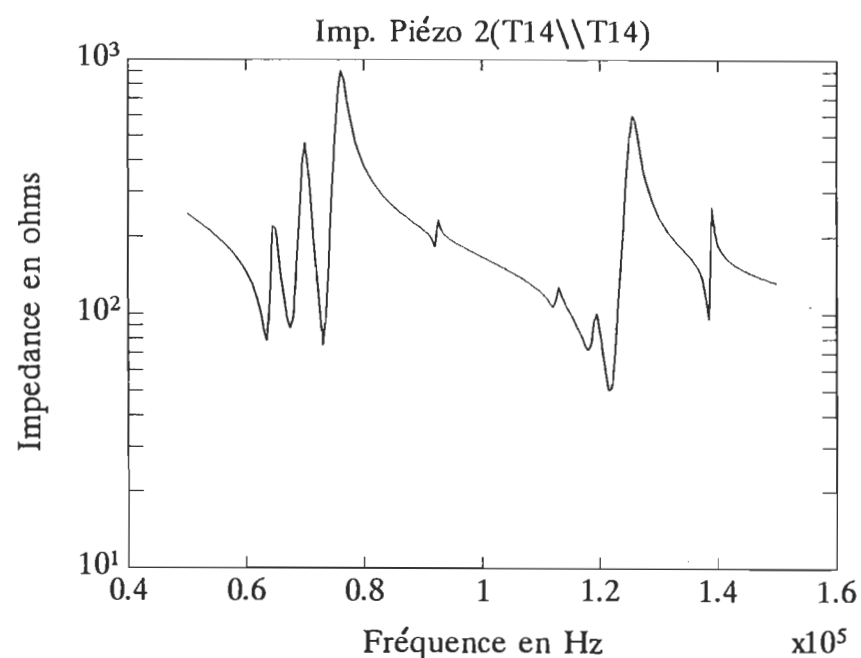
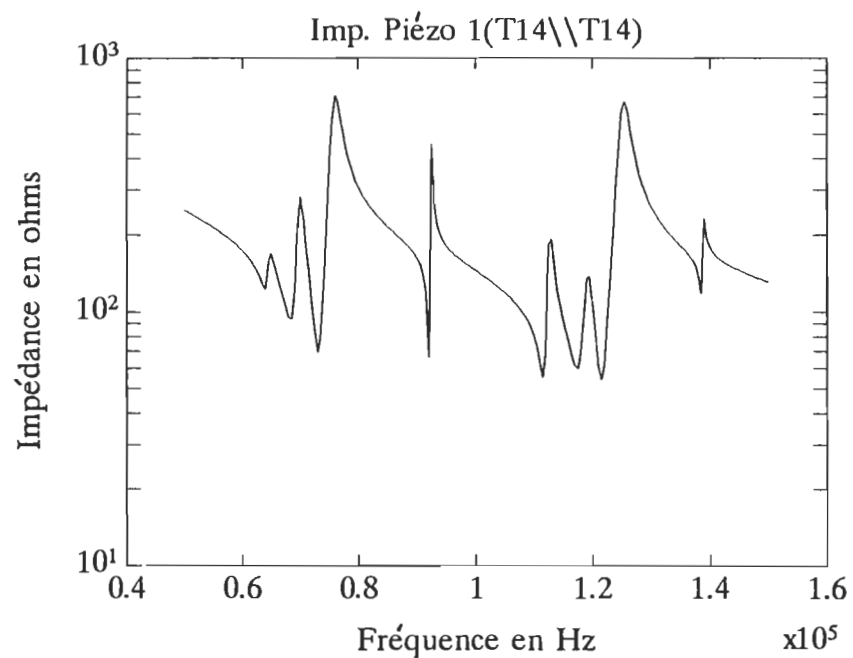


Figure 45 Plusieurs graphiques. Fichier Résona 1.m

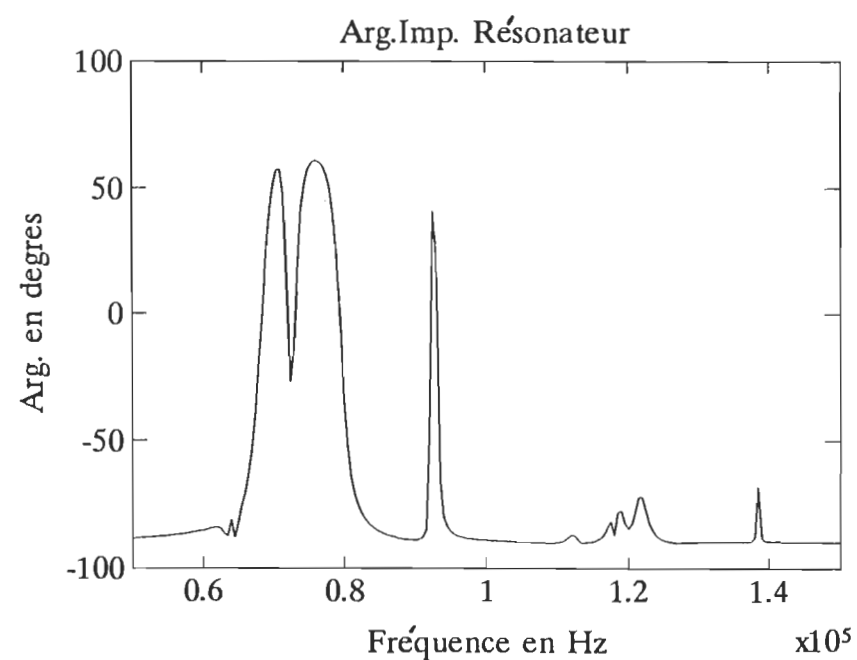
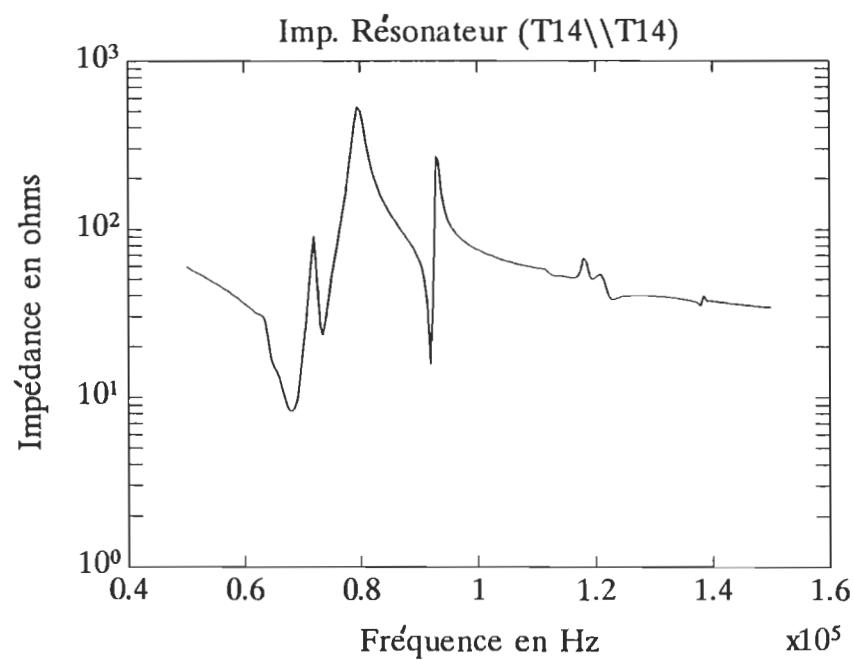
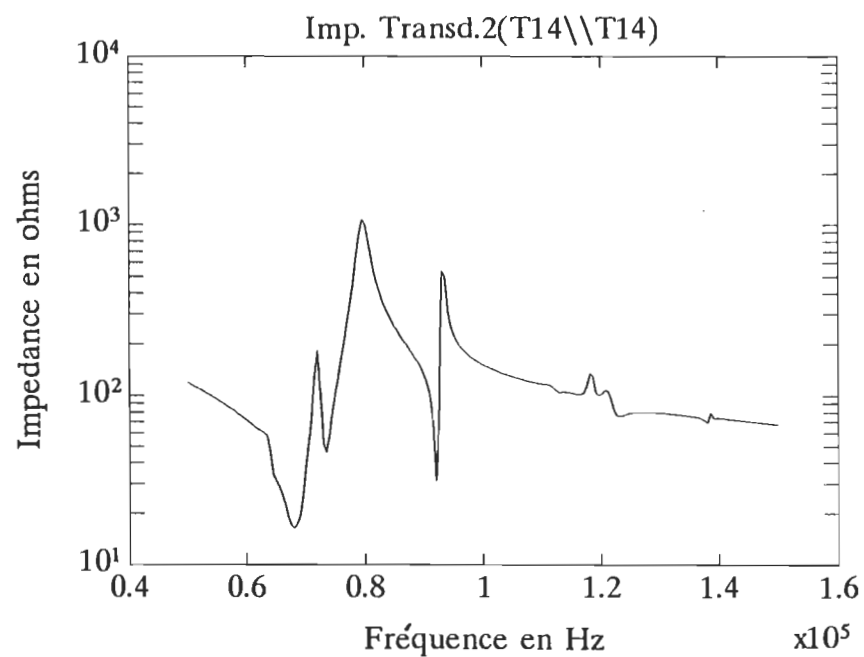
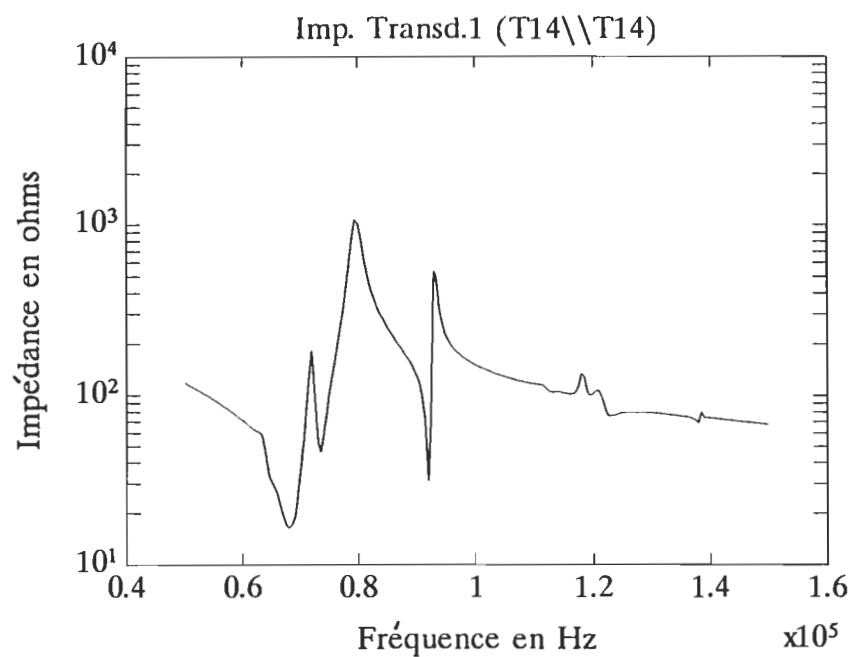


Figure 46 Plusieurs graphiques. Fichier Résona 1.m, tableaux 31 et 32

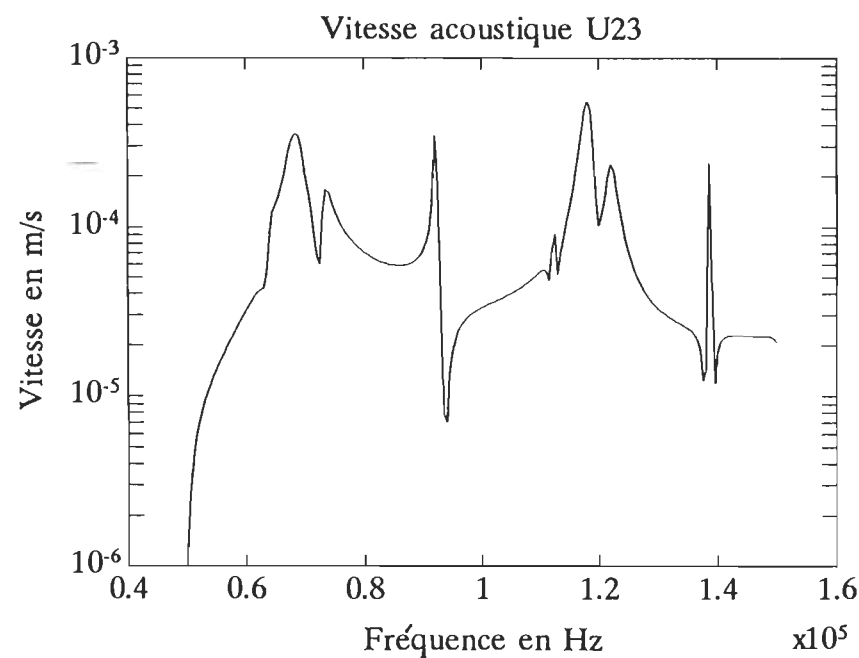
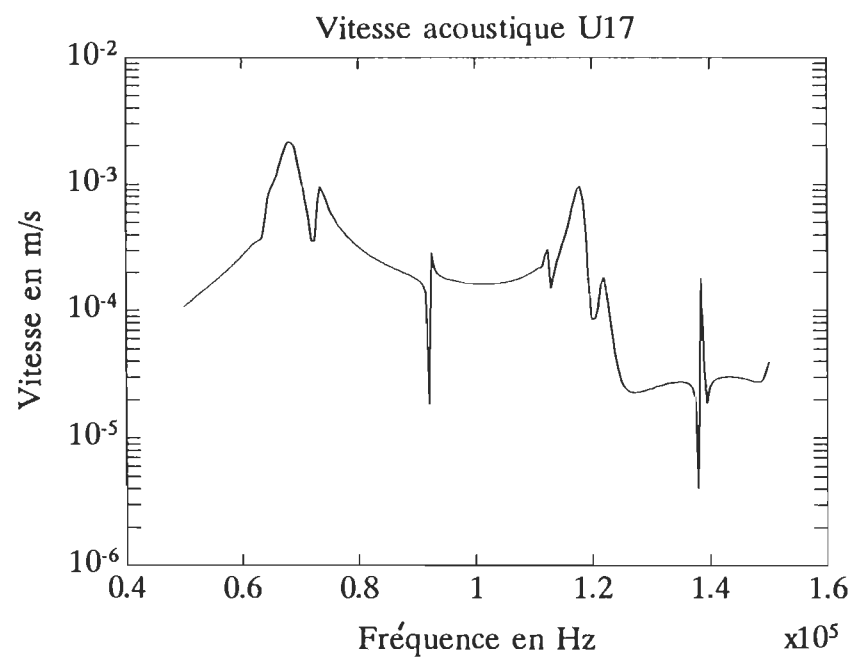
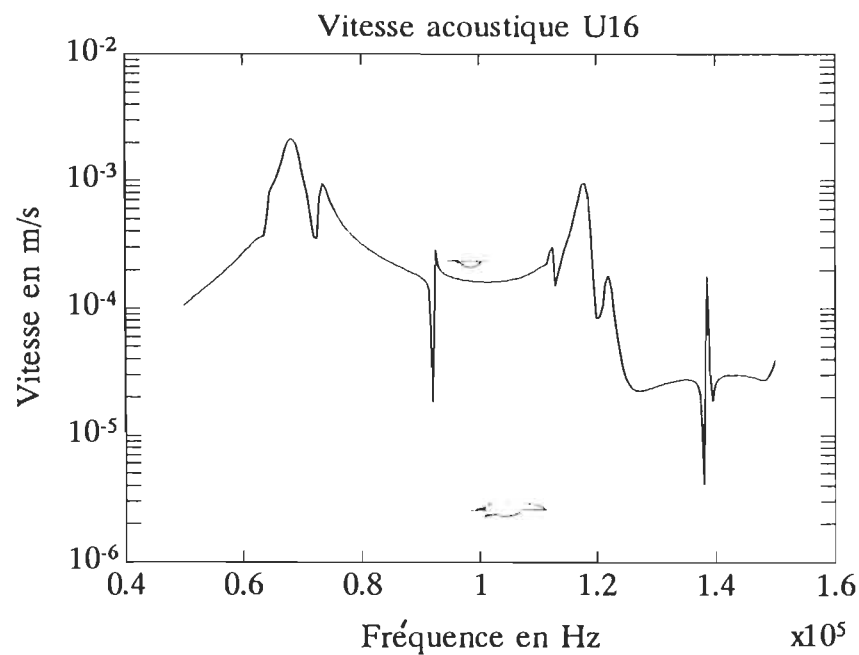
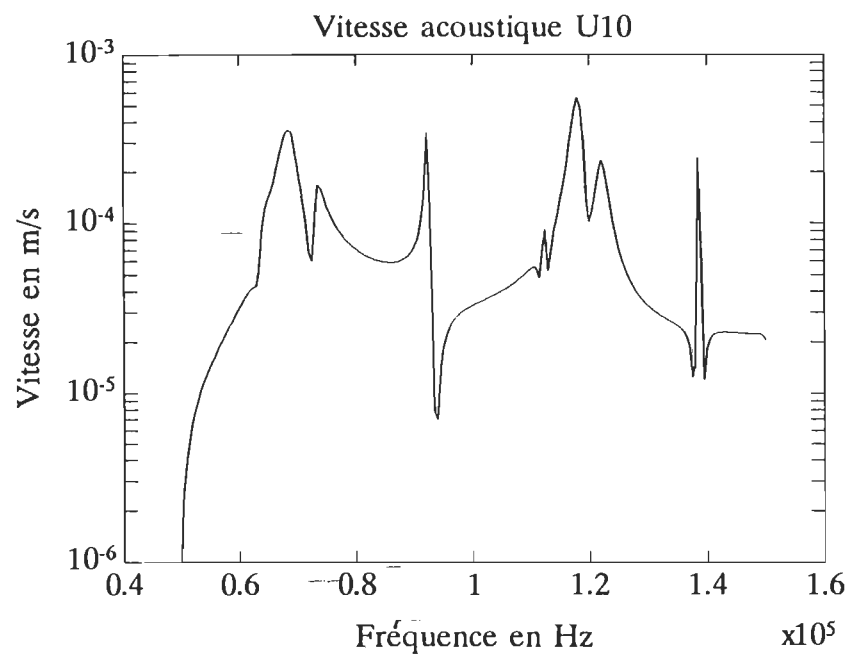


Figure 47a Plusieurs graphiques de la vitesse. Fichier Résona 1.m

4.9 SIMULATION DE TROIS BARREAUX EN PARALLÈLE ÉLECTRIQUEMENT

TABLEAU 33 : FICHER RESONA 7.M	
DONNÉES : ÉLÉMENTS PIÉZOÉLECTRIQUES	
Impédance	: 2.4025×10^7 (R)
Épaisseur	: 16 mm
Constante piézoélectrique	: 2.48×10^9 N/C
Surface	: 0.3142×10^{-4} m
Capacité électrique	: 13 pF
Vitesse V^D	: 3100 m/s
Vitesse V^E	: 2178.33 m/s
Atténuation	: 2 Np/m
Exposant	: 1.13
Fréquence de référence	: 100 KHz
Fréquence inférieure	: 50 KHz
Fréquence supérieure	: 75 KHz
Nombre d'intervalle	: 150
Tension électrique	: 1 Volt
Remarques : Les trois éléments piézoélectriques sont identiques pour la simulation.	

Milieu 9 : 400 R (air)

Milieu 19 : 400 R (air)

TABLEAU 34 : FICHER RÉSONA 7.M		AUTRES MILIEUX	
<u>Milieu 11 (colle)</u>	<u>Milieu 12 (laiton)</u>	<u>Milieu 13 (colle)</u>	<u>Milieu 15 (colle)</u>
Impédance : 1.44×10^6 R	4.042×10^7 R	1.44×10^6 R	1.44×10^6 R
Épaisseur : 0.010 mm	0.025 mm	0.010 mm	0.010 mm
Vitesse : 1200 m/s	4700 m/s	1200 m/s	1200 m/s
Atténuation : 30 Np/m	2 Np/m	30 Np/m	30 Np/m
Exposant : 1.5	1.5	1.5	1.5
<u>Milieu 16 (laiton)</u>	<u>Milieu 17 (colle)</u>		
Impédance : 4.042×10^7 R	1.44×10^6 R		
Épaisseur : 0.025 mm	0.010 mm		
Vitesse : 4700 m/s	1200 m/s		
Atténuation : 2 Np/m	30 Np/m		
Exposant : 1.5	1.5		

TABLEAU 35 : FICHIER RÉSONA 7.M RÉSULTATS MAX-MIN DE $ Z $ (OHMS)			
f(KHz)	Max. de $ Z $ mesure	f(KHz)	Max. de $ Z $ simulation
50	89800	50	90839.98
64.19	3.26×10^5	64.25	3.82×10^5
f(KHz)	Mln. de $ Z $ mesure	f(KHz)	Max. de $ Z $ simulation
61.95	30750	61.25	14684.5
75	72710	75	73913

TABLEAU 36 : FICHIER RÉSONA 7.M ARGUMENTS DE L'IMPÉDANCE EN DEGRÉS			
f(KHz)	Mesure	f(KHz)	Simulation
50	-87.91	50	-89.2289
61.95	28.49	61.25	19.5534
64.19	-31.7	64.25	-32.2276
75	-88.17	75	-89.4001

Structure d'un résonateur à trois éléments piézoélectriques.

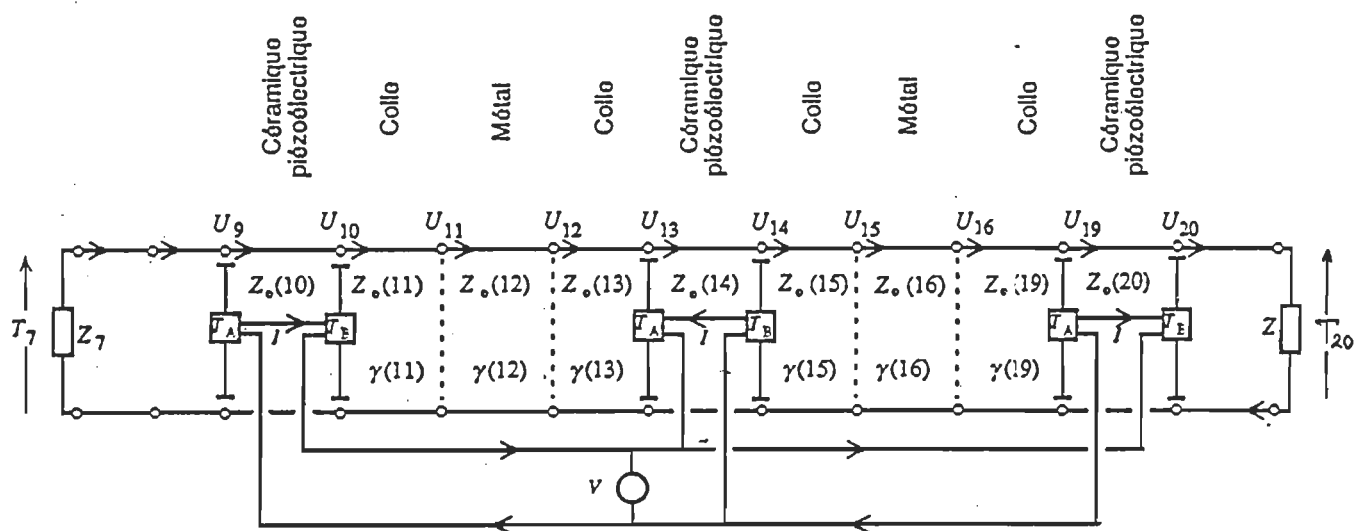


Figure 47b Structure d'un résonateur à trois éléments piézoélectriques.
Fichier Résona 7.m

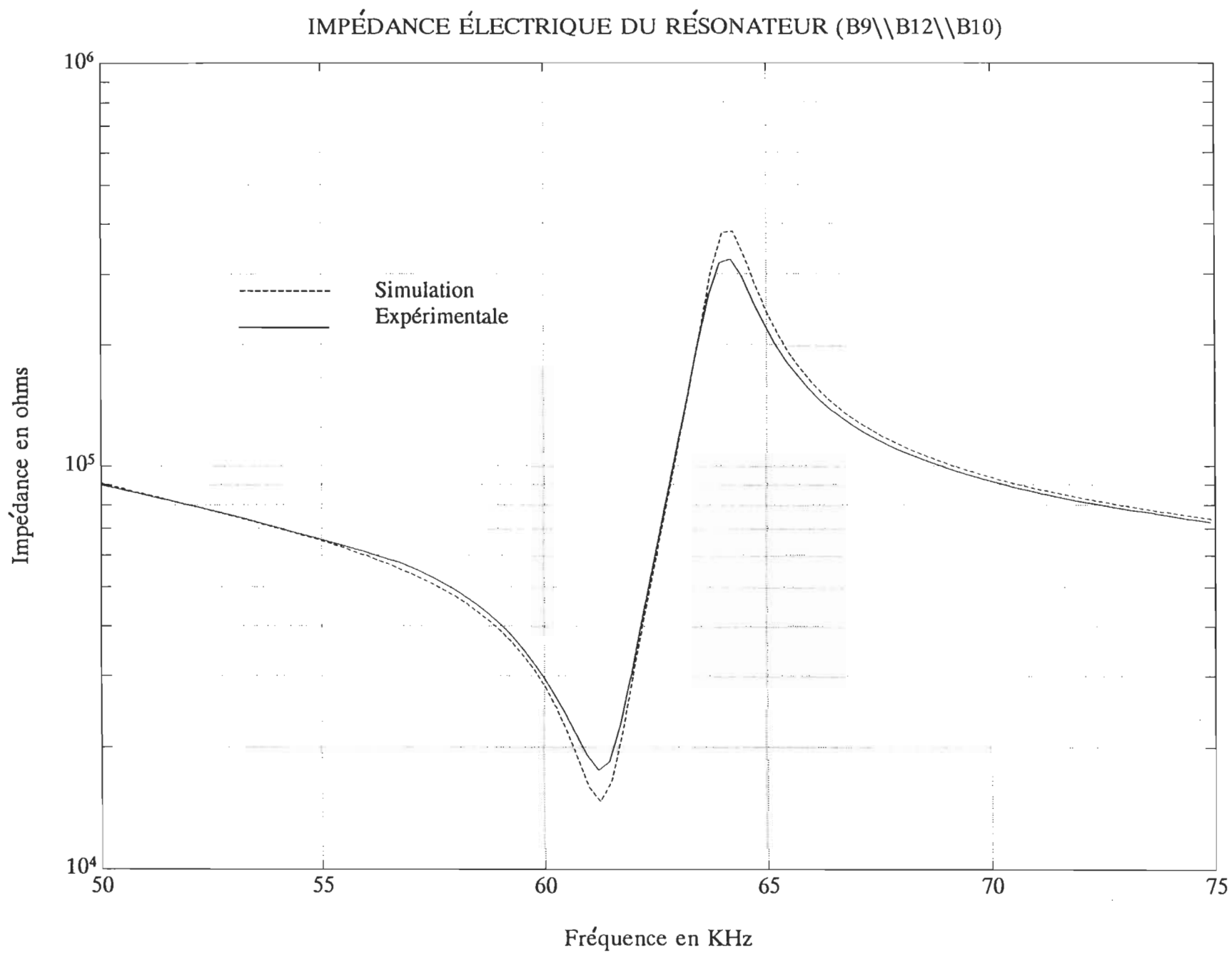


Figure 48 Impédance électrique. Fichier Résona 7.m, tableau 35

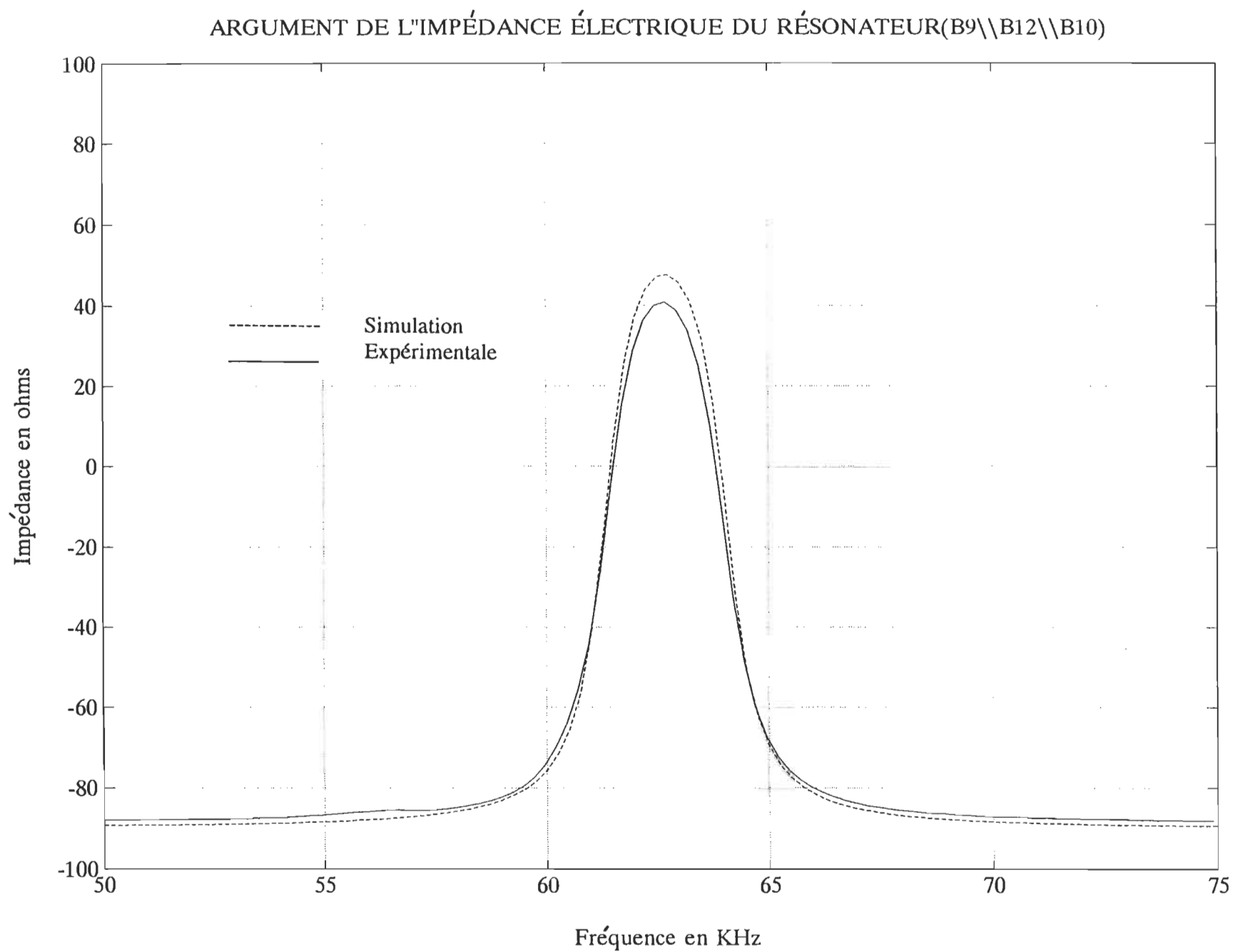


Figure 49 Argument de l'impédance. Fichier Résona 7.m, tableau 36

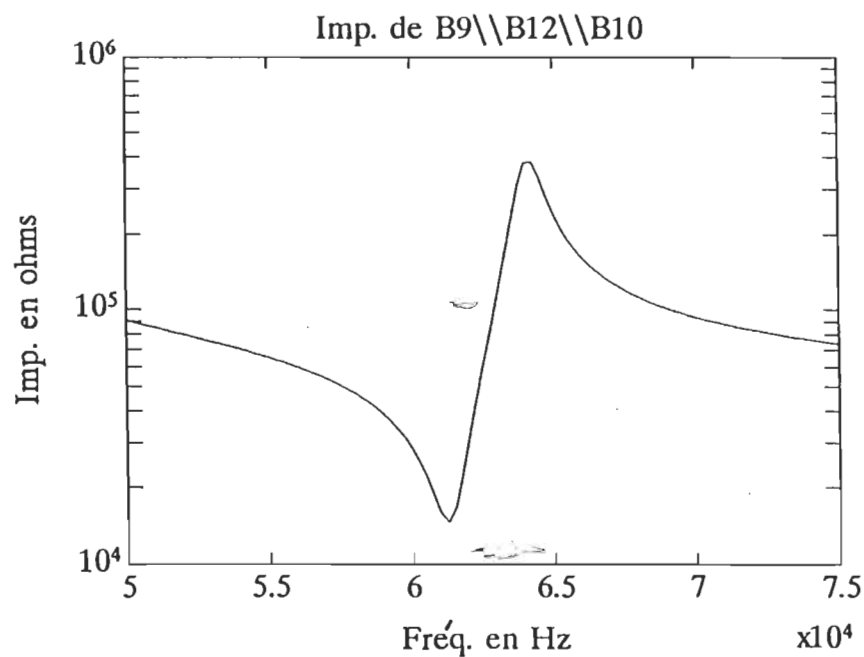
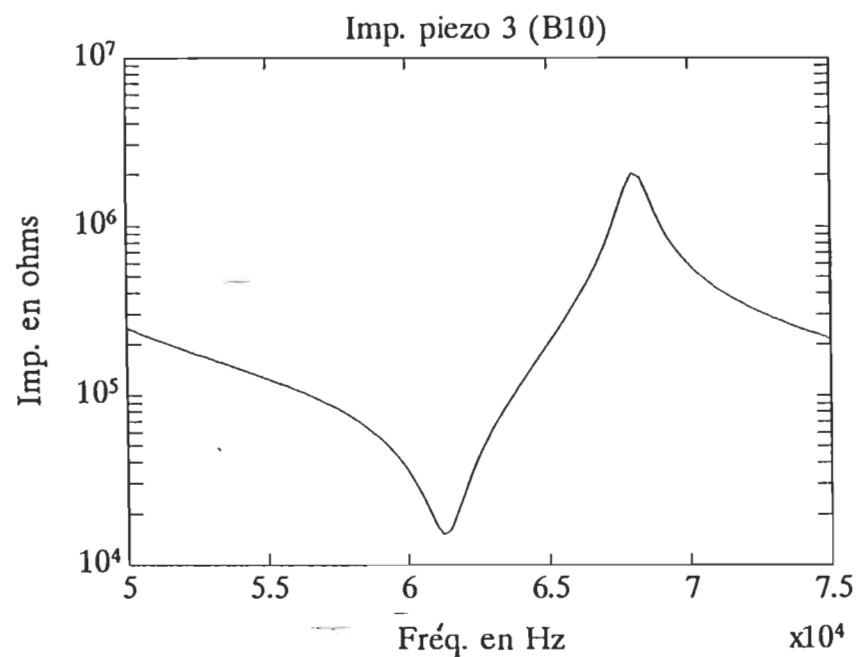
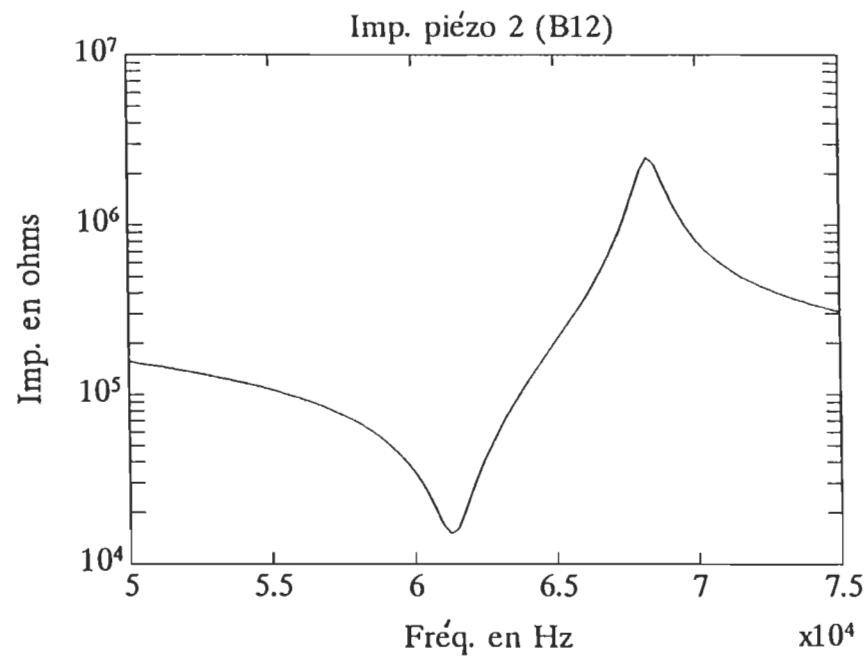
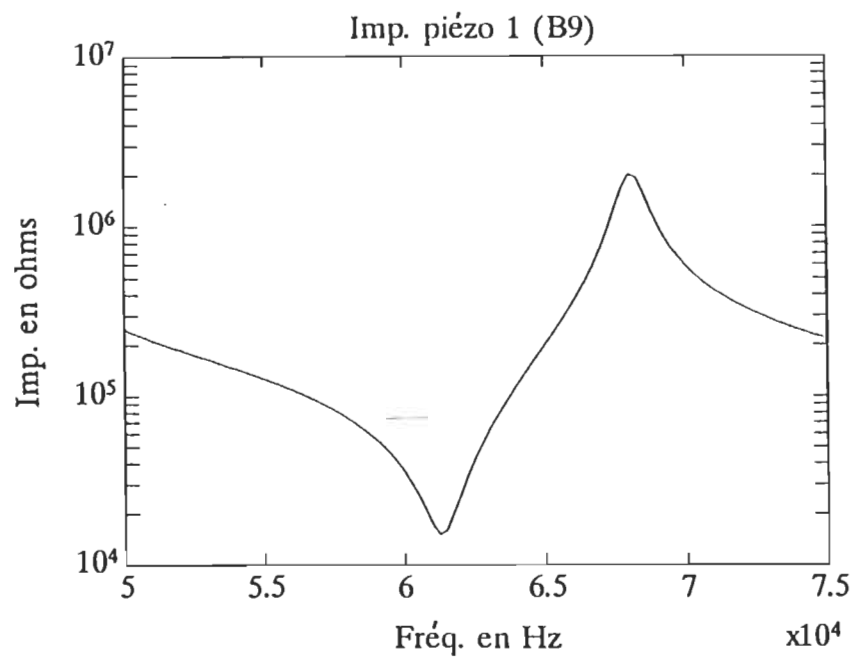


Figure 50 Plusieurs graphiques de l'impédance. Fichier Résona 7.m

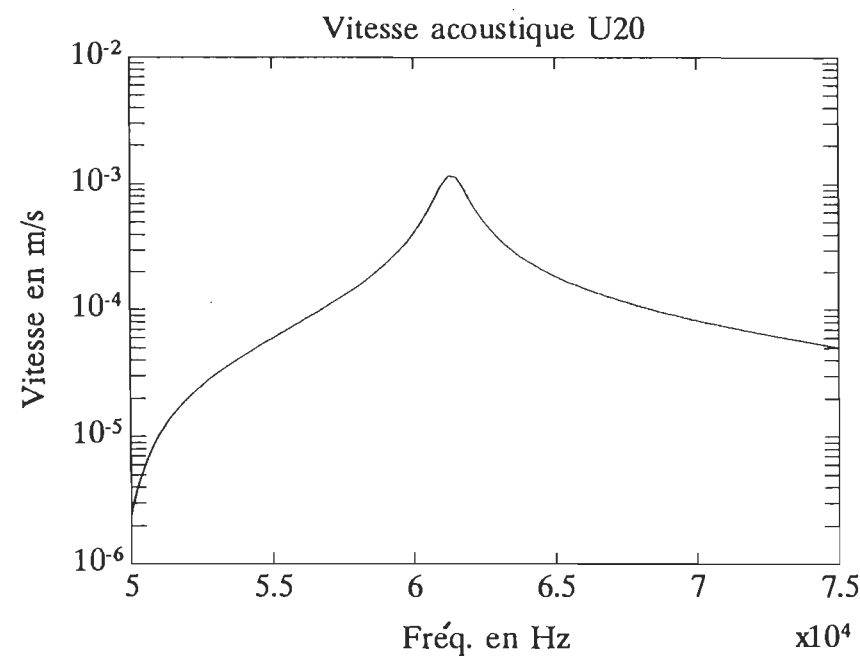
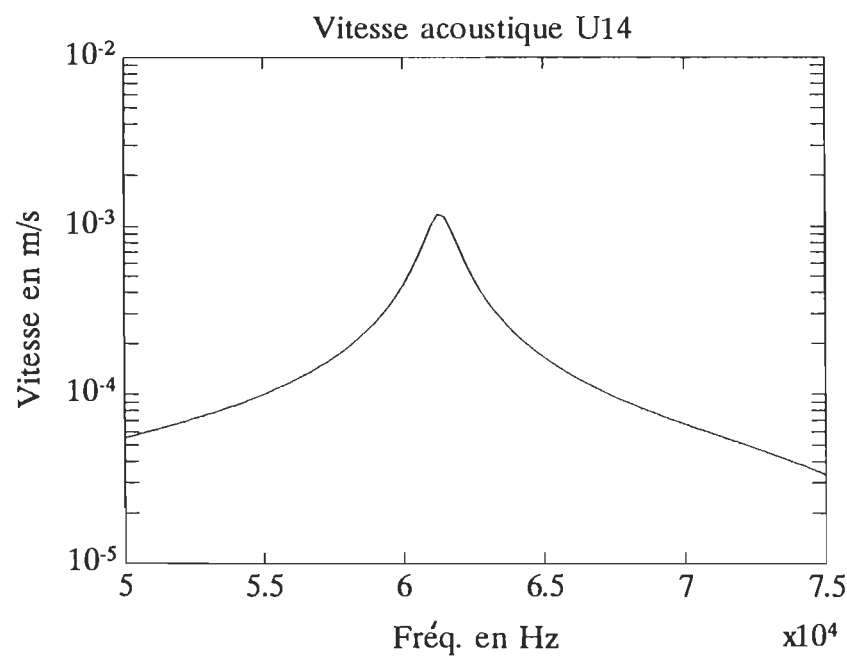
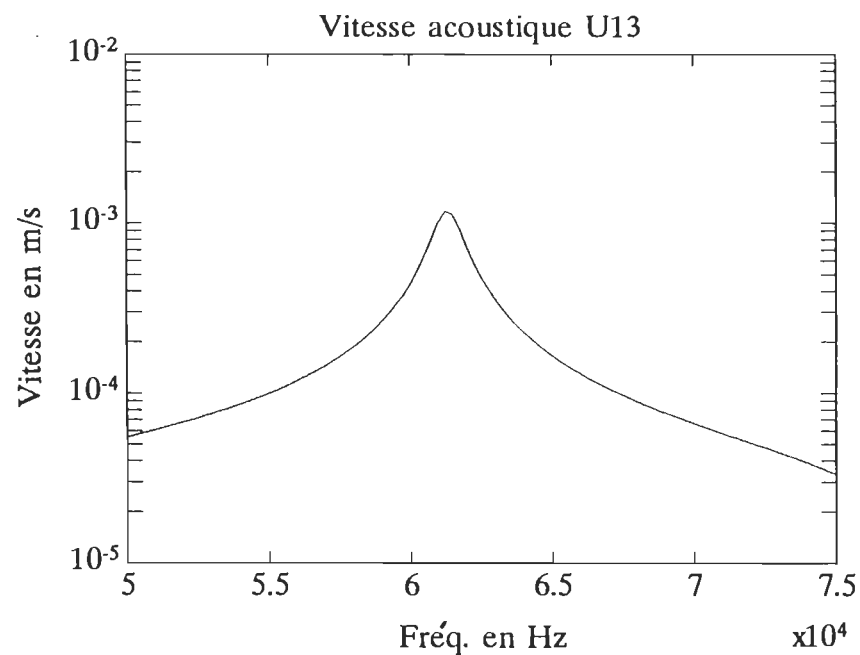
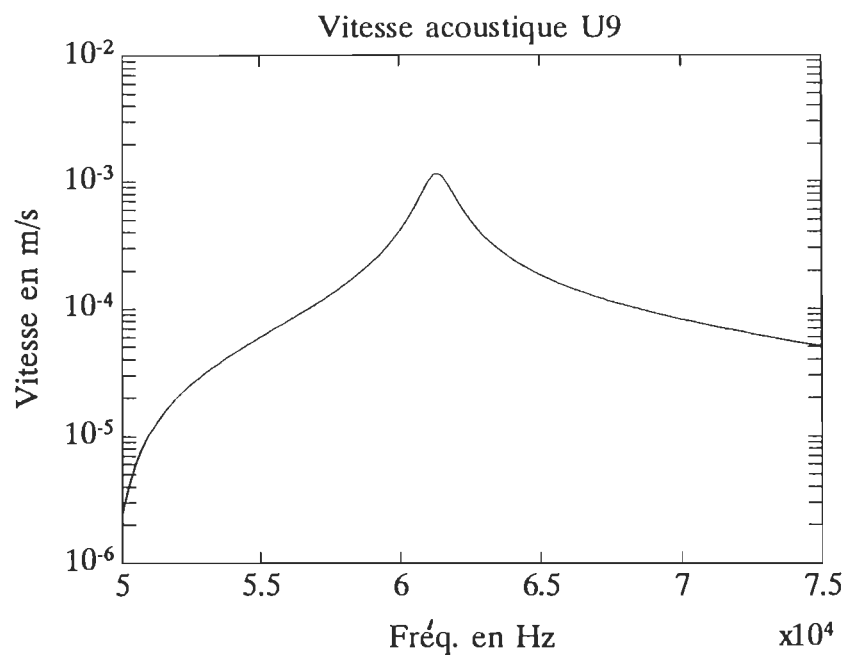


Figure 51 Plusieurs graphiques de la vitesse. Fichier Résona 7.m

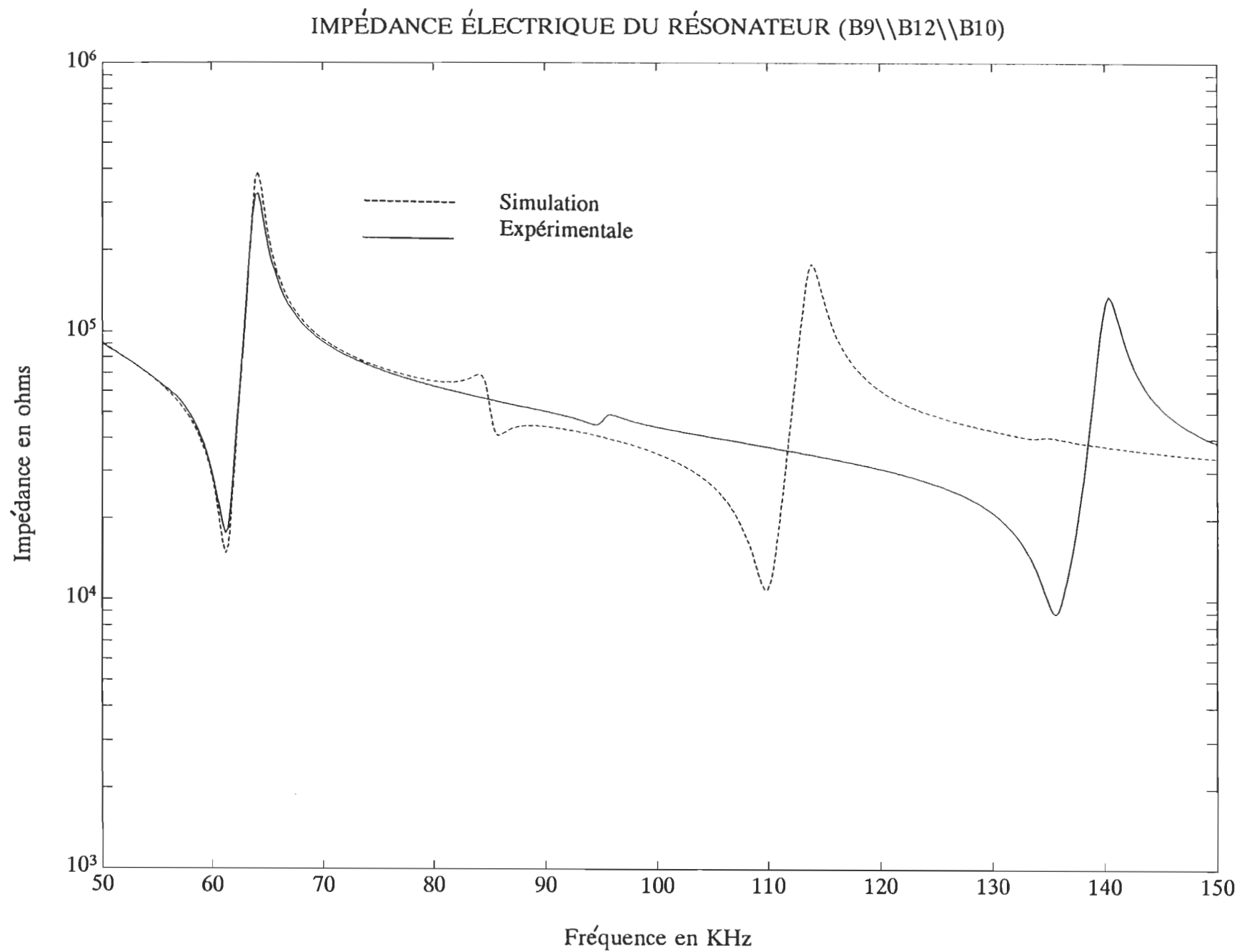


Figure 52 Impédance électrique. Fichier Résona 7.m, tableau 35

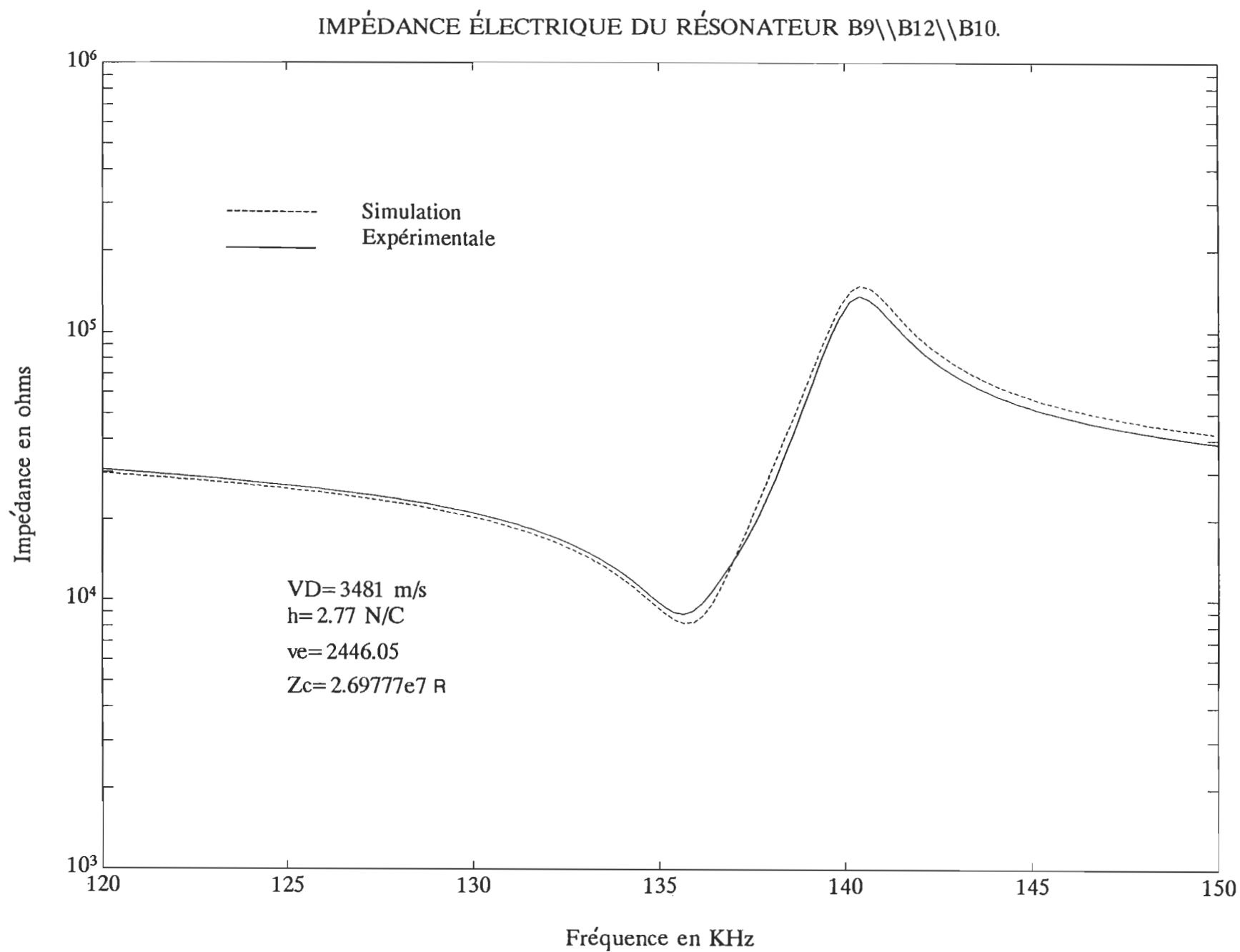


Figure 53 Impédance électrique. Fichier Résona 7.m

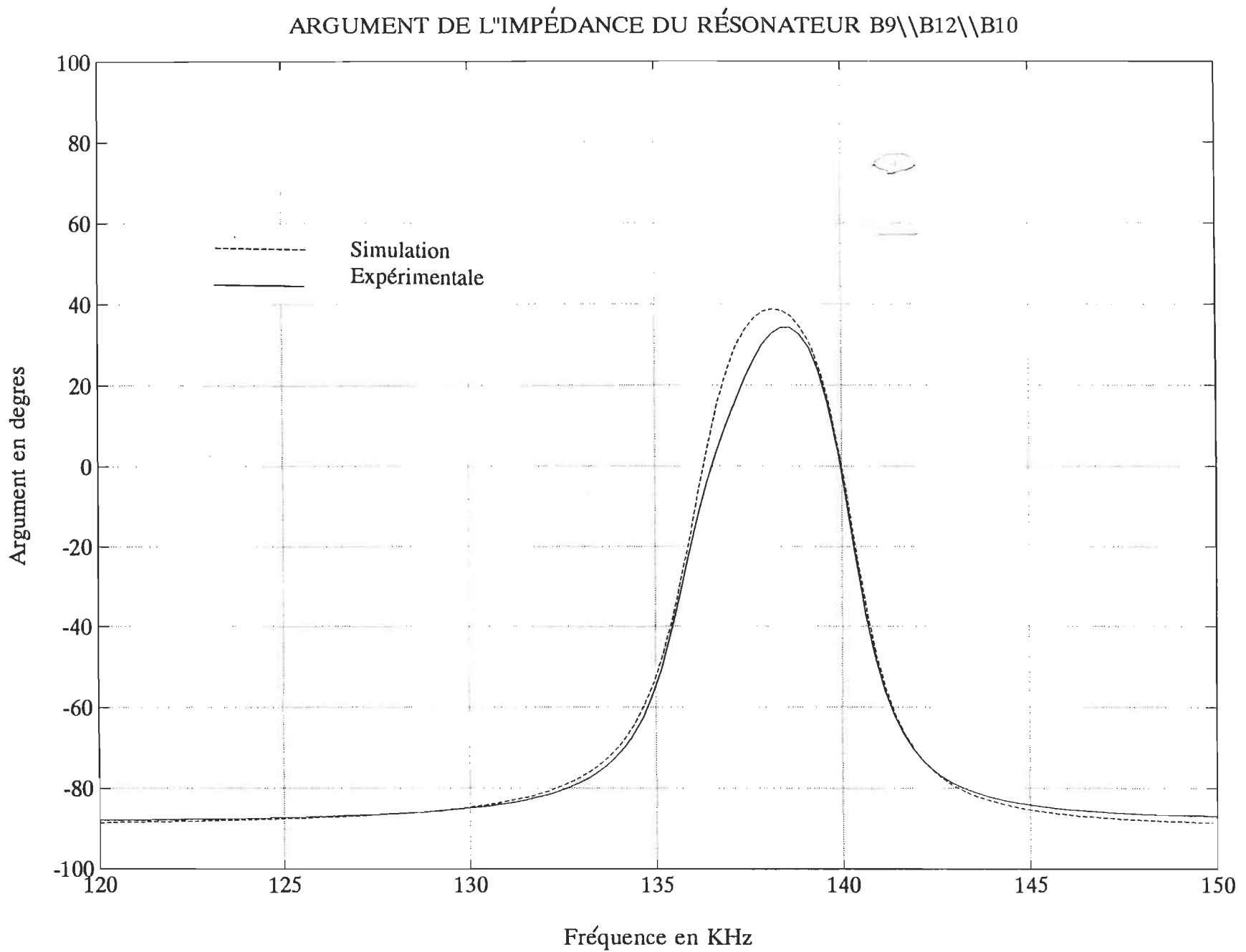


Figure 54 Argument de l'impédance électrique. Fichier Résona 7.m

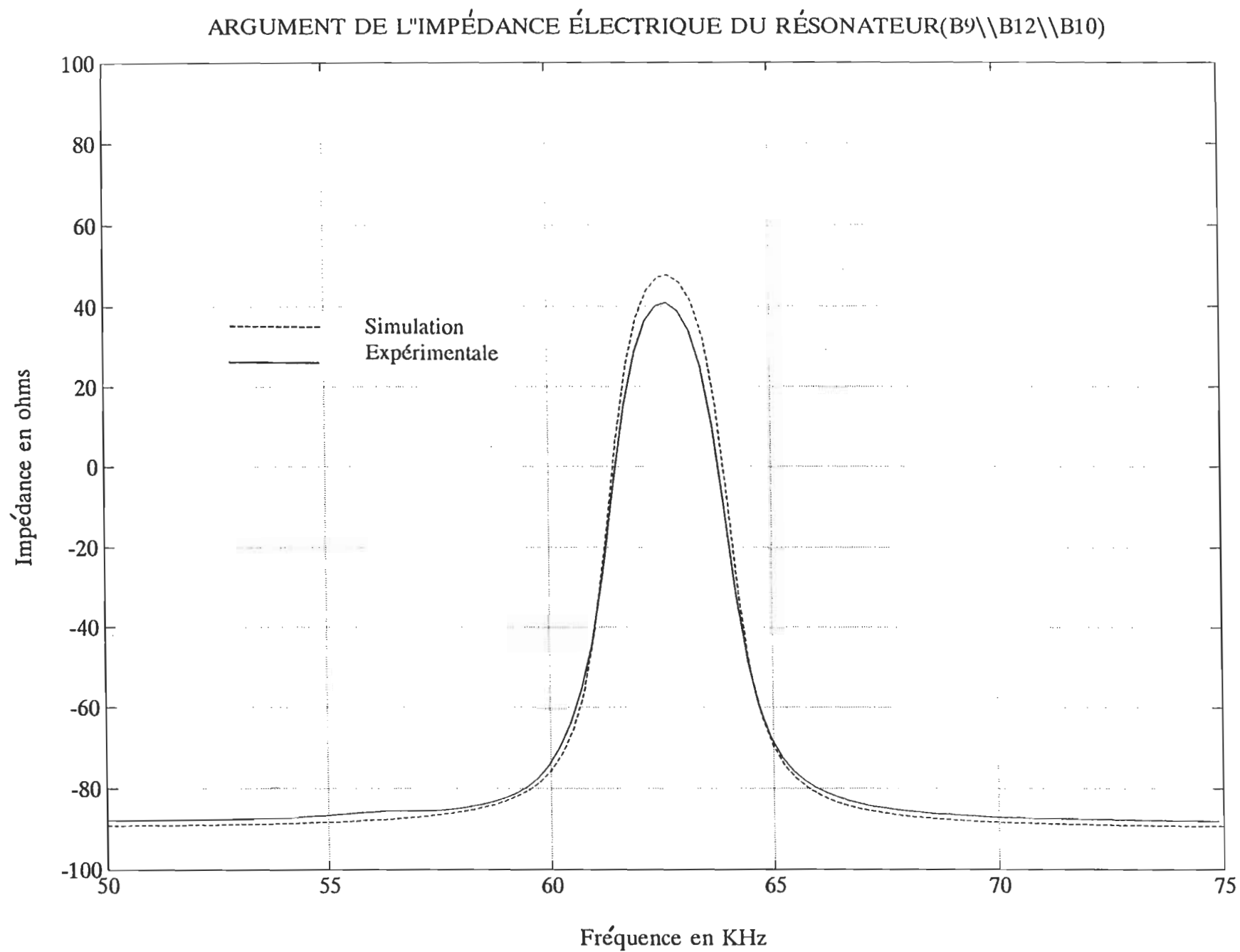


Figure 55 Argument de l'impédance. Fichier Résona 7.m, tableau 36

5. ANALYSES DES RÉSULTATS

La mise au point du programme et les simulations précédentes nous ont donné les résultats espérés, soit numériques ou graphiques. La puissance de "MATLAB" donne sa performance avec la fonction graphique, car on peut visualiser toutes les courbes correspondantes à chaque variable choisie.

5.1 Analyse des résultats d'un seul élément piézoélectrique actif

Pour la boucle d'un seul élément piézoélectrique, on a bien réussi toutes les simulations, voir figures 12 à 25, car on a vérifié tous les résultats avec le programme de M. Dion [14]. Tous les résultats précédents démontrent la puissance de MATLAB surtout la sortie graphique et toutes les options. L'ordinateur utilisé a les caractéristiques techniques suivantes : 80386 Dx, vitesse 33 MHz avec co-processor mathématique. Dans le menu transd.m, on peut trouver les fichiers corresponsants pour simuler un élément piézoélectrique actif avec plusieurs milieux à gauche et à droite. Donc, cette première boucle valide l'algorithme utilisé.

5.2 Analyse des résultats de deux éléments piézoélectrique actifs

La deuxième partie a été l'élaboration d'une boucle pour le calcul des transducteurs composés à deux éléments actifs, d'abord on a mesuré l'impédance électrique et l'argument de l'ensemble de deux barreaux (B4//B8) en parallèle électriquement et en série mécaniquement; ensuite, on a fait la simulation et en tenant compte des couches de colle et laiton, voir figures 26 à 35, on obtient une bonne correspondance entre la mesure et la simulation de l'impédance électrique et l'argument pour un seul mode, c'est-

à-dire pour une fréquence de résonance et antirésonance, car pour une plage de fréquence où il y a plusieurs modes, existe dispersion de la vitesse donc les valeurs de V^D , V^E et h ne sont pas constantes, et on doit trouver une loi de variation en fonction de la fréquence et il faut aussi savoir que la simulation est unidimensionnelle. Avec cette loi, on peut trouver les correspondances pour toutes les fréquences de résonance et antirésonance sur une plage de fréquence donnée. Le nombre d'intervalle maximal pour la simulation est 640, car l'ordinateur est limité par la mémoire vive de 4Mb.

5.3 Analyse des résultats de trois éléments piézoélectriques actifs

La troisième partie est l'élaboration d'une boucle pour le calcul d'un résonateur à trois éléments piézoélectriques actifs, l'algorithme précédent était utilisé pour obtenir cette boucle. On a utilisé trois éléments piézoélectriques (trois barreaux : B9//B12//B10) et on a mesuré l'impédance électrique et l'argument et pour la simulation on tient compte des couches de colle et feuille de laiton et les résultats sont très remarquables avec une correspondance entre la mesure et le calcul par ordinateur de 2 % d'erreur, voir figures 48 à 55.

Le même problème précédent est pour les trois barreaux, car pour une résonance et anti-résonance, la similitude numérique et graphique est parfaite et, pour une plage de fréquence où il y a plusieurs résonances et antirésonances, on obtient un décalage graphique (voir résultats de simulation et mesure) à cause de la variation de la vitesse V^D , V^E et de la valeur de la constante piézoélectrique (h). Comme dans le cas précédent, on doit trouver une loi pour obtenir les fonctions de V^D , V^E et h .

5.4 Analyse des résultats de quatre piézoélectriques actifs

La quatrième partie de ce travail était la simulation de quatre éléments piézoélectriques actifs constituant un résonateur ultrasonore, on a utilisé pour valider l'algorithme de calcul deux (2) transducteurs T14 placés face à face avec une séparation de quelques centimètres, au milieu un liquide, en général de l'eau. En tenant compte des couches de colle et métaux, on obtient des résultats avec une bonne correspondance entre la mesure et la simulation, existant 7.3 % d'erreur par rapport à la mesure. On peut remarquer aussi que pour ce type d'élément piézoélectrique (plaques de céramiques) n'existe pas le problème de la variation de V^D , V^E et h , donc la similitude et correspondance des valeurs de fréquence de résonance et anti-résonance est parfaite pour une plage étendue de fréquence. On peut remarquer aussi que les vitesses acoustiques aux interfaces obtenus par simulation, on n'a pas pu les valider, car on n'a pas des mesures de vitesse, voir figures 45 à 47.

L'étude de la variation d'épaisseur de la couche 16 et 18 du modèle du résonateur fait un effet radical sur l'amplitude de la vitesse acoustique aux interfaces en contact avec le liquide et il faut bien déterminer avec l'aide de ce programme, la valeur d'épaisseur pour obtenir une valeur maximale des vitesses. Les simulations faites nous disent que quand l'épaisseur diminue, les vitesses U_{26} et V_{18} augmentent et quand la couche ou cavité du liquide diminue, il y a aussi une augmentation de l'amplitude des vitesses U_{16} et U_{18} .

CONCLUSION

On présente dans ce projet la nouvelle approche de modélisation unidimensionnelle d'un résonateur ultrasonore, utilisant un traitement très particulier de l'analogie des lignes électriques.

Le modèle a été développé [1] d'une façon naturelle en appliquant un système cohérent d'équations des lignes électriques, suivant l'analogie courant - vitesse acoustique. Toutes les expressions obtenues ont été bien vérifiées en faisant la programmation avec le logiciel MATLAB et les diverses grandeurs calculées sont bien confirmées par les mesures. Les valeurs d'impédance électrique et les variables du résonateur calculée par cette méthode est bien confirmé en faisant quatre boucles de programmation : un, deux, trois et quatre éléments piézoélectriques constituent un résonateur ultrasonore.

Les valeurs calculées d'impédance électrique sont égales aux valeurs expérimentales à mieux de 10 %.

Malgré les calculs sensiblement long pour la boucle à quatre éléments piézoélectriques actifs, les résultats sont très intéressants.

Pour le résonateur à barreaux, il faut déterminer une loi qui nous donne les expressions de V^D , V^E et h en fonction de la fréquence pour obtenir une correspondance pour tous les modes. La prochaine étape de ce projet est d'ajouter une boucle dans le

programme pour calculer les contraintes aux diverses interfaces et les vitesses dans tous les points des milieux.

La contribution principale de ce projet à l'étude du problème d'un résonateur ultrasonore est d'avoir un outil d'étude fonctionnelle et d'améliorer la caractérisation de fibres de pâte à papier du système du laboratoire d'ultrasonique et capteurs de l'Université du Québec à Trois-Rivières.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Dion, J.L., *Modèles unidimensionnels de transducteurs piézoélectriques*, INSA de Lyon, France, 1989-1990.
- [2] Dion, J.L., *Modèle de transducteur piézoélectrique basé sur l'analogie des lignes électriques*, document de travail avec participation de M. Hadj-Mahersi, 1989.
- [3] Dion, J.L., *Un nouveau modèle unidimensionnel de transducteur piézoélectrique*, premier congrès français d'acoustique, Lyon, avril 1990.
- [4] Dion, J.L. et Brissaud, M., *Modélisation de moteurs piézoélectriques modulaires*, journal de physique IV, colloque 9, supplément au journal de physique III, volume 2, avril 1992, France.
- [5] Dion, J.L., *An intuitive multilayered transducer with bases based on transmission line theory*, IEEE Ultrasonic symposium Dever, P711-715, 1987.
- [6] Dion, J.L., *A new approach to one-dimensional piezoelectric transducer modelling*, IEEE-90, Ultrasonic Symposium, Honolulu, Hawaii, décembre 1990.
- [7] Sarvazyan, A.P. and Chalikian, T.V., *Theoretical analysis of an ultrasonic interferometer for precise measurements at high pressures*, Ultrasonic 1991, vol. 29, mars, IEEE.

- [8] Sarvazyan, A.P., Sel'Kov, E.E and Chalikyan, T.V., *Constant-path acoustic interferometer with transition layers for precision measurements in small liquid*, volumes 50V. phys. acoust. 34(6), novembre-décembre 1988.
- [9] Kazys, R.J., *Equivalent circuit of the non-uniform piezoelectric transducer*, Ultrasonic, mai 1976, IEEE.
- [10] Van Kervel, S.J.H. and Thitssen, J.M., *A calculation scheme for the optimum design of ultrasonic transducers*, Ultrasonic, mai 1983, IEEE.
- [11] Ying Chong-fu, Li-Ming-Xian, Zhong Gao-Qi, Liu Xian-Duo and Yang Yu-Rui, *Transient characteristics of thickness mode piezoelectric transducers analyzed with use of Mason's equivalent circuit Aeta Acust.*, No 4, 249-257 (octobre-novembre 1980).
- [12] Mason, W.P., *Electromechanical transducer and Wave filters*, (Van Nostrand, Princeton, N.J., 1948).
- [13] Coursant, Roger Henri, *Les transducteurs ultrasonores*, Acta Électronique, vol. 22, No 2 (1979), p. 129-141.
- [14] Dion, J.L., *Programme en Basic GFA (un élément piézoélectrique actif)*, 1990.
- [15] Dion, J.L., *Lignes électriques, notes partielles pour le cours GEI-1041*, Département d'ingénierie, Université du Québec à Trois-Rivières, hiver 1992.

- [16] Yukio Kagawa and Tatsuo Yamabuchi, *Finite element simulation of a composite piezoelectric*, ultrasonic transducer IEEE transactions on Sonic and Ultrasonics, vol. 5U-26, No 2, mars 1979.
- [17] Domarkas, V.I. and Yu Kazhis R.I., *Matching of a piezoelectric transducer with the working medium*, 50V. phys. Acoust., vol. 20, No 5, mars-avril 1975.
- [18] Filipczynski, L., *Transients, equivalent circuit and negative capacitance of a piezoelectric transducer performing thickness vibrations*, Journal of technical physic 16. 121-135, 1975.
- [19] Kossoff, George, *The effects of backing and matching on the performance of piezoelectric ceramic transducer*, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. 5U-13, No 1, mars 1966.
- [20] Krimholtz, R., Leedom, D.A. and Matthaei, G.L., *New equivalent circuits for elementary piezoelectric transducers*, Electronics letters 25 juin 1970, vol. 6, No 13.
- [21] Desilets, Charles S., Fraser, John D. and Kino, Gordon S., *The design of efficient broad-band piezoelectric transducer*, IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics, vol. 5U-25, No 3, mai 1978.
- [22] Redwood, M., *Transient performance of a piezoelectric transducer*, the journal of the Acoustical society of America, vol. 33, No 4, avril 1961.
- [23] Onoe, Mario, *General equivalent circuit of piezoelectric transducer vibrating in thickness modes*, Electronics and communications in Japan, vol. 55-A, No 5, 1972.

- [24] Martin, Roy, W. and Sigelmann, Ruben A., *Force and electrical therein equivalent circuits and simulation for thickness mode piezoelectric transducers*, Journal of the Acoustical Society of America V.58 (1975), p. 475-489.
- [25] Sigelmann, Rubens A. and Caprihan, Arvind, *Design method for ultrasound transducer using experimental data and computer*, The Acoustical Society of America, vol. 63, No 6, décembre 1977.
- [26] Hayward, G., Macleod, C.J. and Durrani, T.S., *A systems model of the thickness mode piezoelectric transducer*, Journal of the Acoustical Society of America, août 1984.
- [27] Frey, Kinsler, *Fundamentals of Acoustics*, John wiley & Sons, 1962, Second edition.
- [28] Manuel de MATLAB, The Mat Works Inc., février, 1989.

ANNEXE A

Principaux menus du programme pour les fichiers des données

A1 Menu principal, où il y a les 4 programmes pour calculer
les variables d'un résonateur ultrasonore composé.

```

*****
*****
*
*          UNIVERSITÉ DU QUÉBEC A TROIS RIVIÈRES          *
*      Groupe de Recherche en Électronique                *
*      Industrielle (G.R.E.I.)                            *
*
*      LABORATOIRE D"ULTRASONIQUE ET CAPTEURS.            *
*
*      PROGRAMME POUR CALCULER LES VARIABLES              *
*      D"UN RÉSONATEUR ULTRASONORE COMPOSÉ.               *
*
*      Par: Pr J.L.DION, E. CORNIELES. NOV.1992           *
*
*      1.- RÉSONATEUR À UN ÉLÉMENT PIÉZO                  *
*      2.- RÉSONATEUR À DEUX ÉLÉMENT PIÉZO                *
*      3.- RÉSONATEUR À TROIS ÉLÉMENT PIÉZO               *
*      4.- RÉSONATEUR À QUATRE ÉLÉMENT PIÉZO              *
*
*      CHOISIR VOTRE PROBLEME(1,2,3,4,"0" POUR SORTIR)    *
*
*
*****
*****

```

- A2 Différents fichiers de données pour simuler un résonateur à un (1) élément piézoélectrique.

```

*****
*   PROGRAMME POUR SIMULER RÉSONATEUR À UN PIÉZO   *
*****
*   LABORATOIRE D'ULTRASONIQUE                     *
*****
*   FICHIER DES DONNÉES                           *
*****
*   1.- CH25_3.PAR                                *
*   2.- BARR_B1.PAR                                *
*   3.- EGEG_02.PAR                                *
*   4.- BARRA1B1.PAR                               *
*   5.- B_A2EB2.PAR                                *
*   6.- CER_COL4.PAR                               *
*   7.- M2_14C.PAR                                 *
*   8.- HUTMT01E.PAR                              *
*   9.- TR14LL1.PAR                                *
*   10.-CH50_2.PAR                                 *
*   11.-CH25_3A.PAR                                *
*   12.-BARRA2B2.PAR                               *
*   13.-PRUEBA1.PAR                                *
*   14.-PRUEBA2.PAR                                *
*   0.- SORTIR DU PROGRAMME                        *
*****

```

CHOISIR LE FICHIER A SIMULER PAR 1, 2, 3....14 et "0" POUR SORTIR =

A3 Différents fichiers de données pour simuler un résonateur
à deux (2) éléments piézoélectriques.

```
*****
*   PROGRAMME POUR SIMULER RÉSONATEUR À DEUX PIÉZOS   *
*****
*   LABORATOIRE D ULTRASONIQUE                         *
*****
*   FICHIER DES DONNÉES                               *
*****
*   1.-RÉSON1.PAR                                     *
*   2.-RÉSON2.PAR                                     *
*   3.-RÉSON3.PAR                                     *
*   4.-RÉSON4.PAR                                     *
*   5.-RÉSON5.PAR                                     *
*   6.-RÉSON6.PAR                                     *
*   7.-RÉSON7.PAR                                     *
*   8.-RÉSON8.PAR                                     *
*   9.-RÉSON9.PAR                                     *
*   10.-RÉSON10.PAR                                    *
*   0.-SORTIR DU PROGRAMME                           *
*****
```

CHOISIR LE FICHIER A SIMULER PAR 1, 2, 3....10 et "0" POUR SORTIR =

- A4 Différents fichiers de données pour simuler un résonateur à trois (3) éléments piézoélectriques.

```

*****
*   PROGRAMME POUR SIMULER RÉSONATEUR A 3 PIÉZOS   *
*****
*   LABORATOIRE D'ULTRASONIQUE                     *
*****
*   FICHIER DES DONNÉES                           *
*****
*   1.-RÉSONAT1.PAR                                *
*   2.-RÉSONAT2.PAR                                *
*   3.-RÉSONAT3.PAR                                *
*   4.-RÉSONAT4.PAR                                *
*   5.-RÉSONAT5.PAR                                *
*   6.-RÉSONAT6.PAR                                *
*   7.-RÉSONAT7.PAR                                *
*   Ø.-SORTIR DU PROGRAMME                         *
*****

```

CHOISIR LE FICHIER A SIMULER PAR 1, 2,7 et "Ø" POUR SORTIR =

A5 Différents fichiers de données pour simuler un résonateur à 4 éléments piézoélectriques.

```

*****
*   PROGRAMME POUR SIMULER RÉSONATEUR À 4 PIÉZOS   *
*****
*   LABORATOIRE D'ULTRASONIQUE                     *
*****
*   FICHIER DES DONNÉES                           *
*****
*   1.-RÉSONA1.PAR                                *
*   2.-RÉSONA2.PAR                                *
*   3.-RÉSONA3.PAR                                *
*   4.-RÉSONA4.PAR                                *
*   5.-RÉSONA5.PAR                                *
*   6.-RÉSONA6.PAR                                *
*   7.-RÉSONA7.PAR                                *
*   Ø.-SORTIR DU PROGRAMME                        *
*****

```

CHOISIR LE FICHIER A SIMULER PAR 1, 2,7 et "Ø" POUR SORTIR =

ANNEXE B

Programme de simulation réalisé sur PCMATLAB/ATMATLAB

Organigramme de la boucle d'un élément piézoélectrique

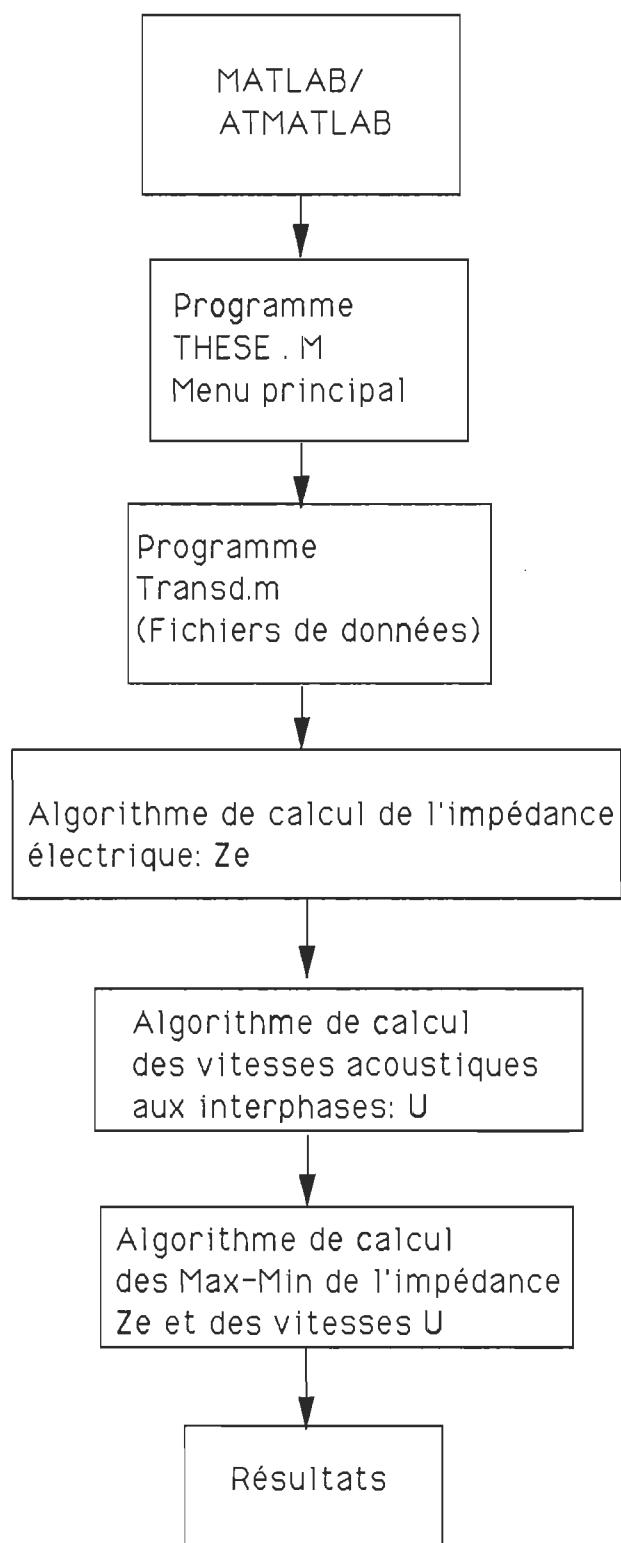


Figure 55a Organigramme de la boucle d'un élément piézoélectrique.

```

%*****
%PROGRAMME POUR CALCULER LES VARIABLES D'UN ÉLÉMENT
%PIÉZOÉLECTRIQUE
%EN UTILISANT L'ANALOGIE ÉLECTRO-ACOUSTIQUE. Avril 1992.
%*****
%*****
fprintf('*****\n')
fprintf('*   CALCUL EN COURS   *\n')
fprintf('*****\n')
%*****
Fi=fi;
Fs=fs;
Ni=ni;
%*****PLAGE DE FRÉQUENCE*****
f=Fi:(Fs-Fi)/Ni:Fs;
%*****
%ALGORITHME DE CALCUL
%*****
W=2*pi*f;
if E==0,
    c1=Z1o.*vv;
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*   UN ÉLÉMENT PIÉZOÉLECTRIQUE SANS COUCHES   *\n')
    fprintf('*****\n')
    C20=(c1.*vv*Krr./((f.*pi)).*((f./fr).^Nn);
    Z02=(Z1o.*(1+j*(C20./(2.*c1))));
    K00=W./vv;
    K10=Krr.*((f./fr).^Nn);
    go=(K10+j.*(K00));
    F1=Z02.*cosh(go.*ap)./sinh(go.*ap);
    F2=Z02./sinh(go.*ap);
    K=h./(j.*W.*A);
    N=(K.^2).*(ZA+zo-2*(F2-F1))*A;
    D=F2.^2-F1.^2-ZA*zo-F1.*(ZA+zo);
    Ze=(N./D-j./(W.*Co));
    G1=((F1-F2+ZA).*K./D);
    G2=((F2-F1-zo).*K./D);
    Ve=1;
    V1=G1.*Ve./Ze;
    Arg1=angle(V1).*180./pi;
    V9=abs(V1);
    V2=G2.*Ve./Ze;
    Arg2=angle(V2).*180./pi;
    V10=abs(V2);
    VD=abs(V2)-abs(V1);
    ZZ=abs(Ze);
    ArgZ=angle(Ze).*180./pi;
    npt=length(f);
    D=ZZ(2)-ZZ(1);
    if D>0
        Mn=[ZZ(1);f(1)];

```

```

Mx=[];
else
  Mx=[ZZ(1);f(1)];
  Mn=[];
end
l=2;
while l+1<npt
  D=ZZ(l+1)-ZZ(l);
  Max=[];
  while D>0 & l+1<npt
    Max=[ZZ(l+1);f(l+1)];
    l=l+1;
    D=ZZ(l+1)-ZZ(l);
  end
  if l+1==npt
    Mx=[Mx[ZZ(l+1);f(l+1)]];
  else
    Mx=[Mx Max];
    Min=[];
    while D<0 & l+1<npt
      Min=[ZZ(l+1);f(l+1)];
      l=l+1;
      D=ZZ(l+1)-ZZ(l);
    end
    if l+1==npt
      Mn=[Mn[ZZ(l+1);f(l+1)]];
    else
      Mn=[Mn Min];
    end
  end
end
H=V2(2)-V2(1);
if H>0
  Mn2=[V2(1);f(1)];
  Mx2=[];
else
  Mx2=[V2(1);f(1)];
  Mn2=[];
end
l=2;
while l+1<npt
  H=V2(l+1)-V2(l);
  Ma2=[];
  while H>0 & l+1<npt
    Ma2=[V2(l+1);f(l+1)];
    l=l+1;
    H=V2(l+1)-V2(l);
  end
  if l+1==npt
    Mx2=[Mx2[V2(l+1);f(l+1)]];
  else
    Mx2=[Mx2 Ma2];
  end
end

```

```

Mi2=[];
while H<0 & l+1<npt
    Mi2=[V2(l+1);f(l+1)];
    l=l+1;
    H=V2(l+1)-V2(l);
end
if l+1==npt
    Mn2=[Mn2[V2(l+1);f(l+1)]];
else
    Mn2=[Mn2 Mi2];
end
end
H1=V1(2)-V1(1);
if H1>0
    Mn1=[V1(1);f(1)];
    Mx1=[];
else
    Mx1=[V1(1);f(1)];
    Mn1=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    H1=V1(l+1)-V1(l);
    Ma1=[];
    while H1>0 & l+1<npt
        Ma1=[V1(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        H1=V1(l+1)-V1(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx1=[Mx1[V1(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx1=[Mx1 Ma1];
        Mi1=[];
        while H1<0 & l+1<npt
            Mi1=[V1(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            H1=V1(l+1)-V1(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn1=[Mn1[V1(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn1=[Mn1 Mi1];
        end
    end
end
[n3,n1]=size(Mx1);
[q4,q1]=size(Mn1);
[e2,n2]=size(Mx2);
[q3,q2]=size(Mn2);
[m,n]=size(Mx);

```

```

[qq,q]=size(Mn);
L=input('VOULEZ L'IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE OU LES VITESSES ACOUSTIQUES(1/0)=')
if L==1;
    semilogy(f,ZZ)
    grid
    title('IMPÉDANCE ÉLECTRIQUE DU TRANSDUCTEUR PIÉZOÉLECTRIQUE')
    xlabel('FRÉQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPÉDANCE EN OHMS')
    pause
    G=input('VOULEZ LES VALEURS MAX-MIN DE L'IMPÉDANCE (1/0)=')
    if G==1
        for K=1:1:n;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxZ=%e\n',Mx(1,K))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx(2,K))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for R=1:1:q;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn(1,R))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn(2,R))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
end
end
S=input('VOULEZ-VOUS LES VITESSES ACOUSTIQUE SUR CHAQUE SURFACE (1/0)=')
if S==0;
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
    pause(3)
    break
end
if S==1;
    Y=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE À DROITE OU À GAUCHE (1/0)=')
    if Y==1;
        semilogy(f,V10)
        title('VITESSE ACOUSTIQUE [V9,Kr=1.52] et [V9,Kr=0](AIR-CER.)')
        xlabel('FRÉQUENCE EN Hz.')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
        grid
        pause
        GG=input('VOULEZ LES VALEURS MAX-MIN DE LA VITESSE À DROITE (1/0)=')
        if GG==1;
            for KK=1:1:n2;
                fprintf('*****\n')
                fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx2(1,KK))
                fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx2(2,KK))
                fprintf('*****\n')
            end
            pause
            for RR=1:1:q2;
                fprintf('*****\n')
            end
        end
    end
end

```

```

        fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn2(1,RR))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn2(2,RR))
        fprintf('*****\n')
    end
end
pause
T=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE A GAUCHE DU PIEZO (1/0)=')
if T==1;
    semilogy(f,V9)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE [V9]')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz.')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    FF=input('VOULEZ LES VALEURS MAX-MIN DE LA VITESSE A GAUCHE(1/0)=')
    if FF==1
        for K=1:1:n1;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx1(1,K))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx1(2,K))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for R=1:1:q1;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn1(1,R))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn1(2,R))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
end
if T==0;
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
    pause(1)
    break
end
end
end
if Y==0;
    semilogy(f,V9)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE [V9]')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz.')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    B=input('VOULEZ-VOUS VITESSE A DROITE DU PIEZO (1/0)=')
    if B==1;
        semilogy(f,V10)
        title('VITESSE ACOUSTIQUE A DROITE DU PIEZO')
        xlabel('FREQUENCE EN Hz.')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    end
end
end

```



```

        grid
        pause
        fprintf('FIN DE CALCUL\n')
        pause(3)
        if B==0;
            fprintf('FIN DE CALCUL\n')
            pause(3)
            break
        end
    end
end
if L==0;
    fprintf('*****\n')
    F=input('* VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE A DROITE OU GAUCHE (1/0)=')
    if F==1;
        semilogy(f,V10)
        grid
        title('VITESSE ACOUSTIQUE [V10]')
        xlabel('FREQUENCE EN Hz.')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE m/s')
        pause
        R=input('VOULEZ LA VITESSE A GAUCHE (1/0)=')
        if R==1;
            semilogy(f,V9)
            grid
            title('VITESSE ACOUSTIQUE [V9]')
            xlabel('FREQUENCE EN Hz.')
            ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE m/s')
            pause
        end
        if R==0;
            break
        end
    end
end
if F==0;
    semilogy(f,V9)
    grid
    title('VITESSE ACOUSTIQUE [V9]')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz.')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE m/s')
    pause
    R=input('VOULEZ LA VITESSE A DROITE (1/0)=')
    if R==1;
        semilogy(f,V10)
        grid
        title('VITESSE ACOUSTIQUE [V10]')
        xlabel('FREQUENCE EN Hz.')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE m/s')
        pause
    end
end
end

```

```

RR=[f' ZZ' V9' V10'];
QQ=[f' ArgZ' Arg1' Arg2'];
WW=input('VOULEZ LES VALEURS DES VARIABLES [Z],[V10],[V9] (1/0)=')
format short e
if WW==1
    fprintf('Freq.(Hz)    [Z Ohms]    [U9 m/s]    [U10 m/s]\n')
    X=length(f);
    A=0;
    while A~=X
        for l=1:1:4;
            A=A+1;
            Q=[f(1,A)' ZZ(1,A)' V9(1,A)' V10(1,A)']
            if A==X
                break
            end
        end
    end
    pause
end
HH=input('VOULEZ LES VALEURS DES ARGUMENT [Z],[V10],[V9] (1/0)=')
format short e
if HH==1
    fprintf('Freq.(Hz)    [Z degree]    [U9 degree]    [U10egre]\n')
    X=length(f);
    A=0;
    while A~=X
        for l=1:1:4;
            A=A+1;
            Q=[f(1,A)' ArgZ(1,A)' Arg1(1,A)' Arg2(1,A)']
            if A==X
                break
            end
        end
    end
    pause
end
fprintf('TOUCHEZ [ Ctrl p] POUR ACTIVER ET DESACTIVER L IMPRIMANTE\n')
E=input('VOULEZ SORTIR LES VALEURS [Z],[U10],[U9] PAR L IMPRIMANTE (1/0)=')
if E==1
    if C==11
        tesis11
    end
    if C==21
        tesis21
    end
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*  VALEURS [Z], [U10],[U9]          *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('Freq.(Hz)    [Z Ohms]    [U9 m/s]    [U10 m/s]\n')
    RR
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*  VALEURS DES ARGUMENTS          *\n')

```

```

fprintf('*****\n')
fprintf('Freq.(Hz)      [Z dg]      [U9 dg]      [U10 dg]\n')
QQ
pause
end
fprintf('TOUCHEZ [ Ctrl p ] POUR ACTIVER ET DESACTIVER L IMPRIMANTE\n')
K=input('VOULEZ SORTIR LES VALEURS Max-Min PAR L IMPRIMANTE (1/0)=')
if K==1
    if C==11,
        tesis11
    end
    if C==21,
        tesis21
    end
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*          VALEURS MAX-MIN.          *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MAX-IMPEDANCE ELECTRIQUE      MIN-IMPEDANCE ELECTRIQUE\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf(' [Z Ohms]      FREQ(Hz)      [Z Ohms]      FREQ(Hz)\n')
    fprintf('*****\n')
    RES=[Mx' Mn']
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MAX-VITESSE [U9]\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf(' [U m/s]      FREQ(Hz) \n')
    fprintf('*****\n')
    Mx1'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MIN-VITESSE [U9]\n')
    fprintf('*****\n')
    Mn1'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MAX-VITESSE [U10]\n')
    fprintf('*****\n')
    Mx2'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MIN-VITESSE [U10]\n')
    fprintf('*****\n')
    Mn2'
    fprintf('*****\n')
end
if K==0
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
end
break
end
%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL A GAUCHE ET A DROITE DU PIEZO
%*****
if E==1,
    for m=i:-1:1;

```

```

c1=Zo(m).*v(m);
C2=(c1.*v(m).*Kr(m)./(f.*pi)).*((f./fr).^ Np(m));
c=c1+j.*C2;
Ko=W./v(m);
K1=Kr(m).*((f./fr).^ Np(m));
g=(K1+j.*(Ko));
Zoo=c.*g./(j.*W);
NUN=(Z1+Zoo.*tanh(g.*a(m))).*Zoo;
DEN=(Zoo+Z1.*tanh(g.*a(m)));
if m==20,
    Z20=NUN./DEN;
    Z1=Z20;
elseif m==19,
    Z19=NUN./DEN;
    Z1=Z19;
elseif m==18,
    Z18=NUN./DEN;
    Z1=Z18;
elseif m==17,
    Z17=NUN./DEN;
    Z1=Z17;
elseif m==16,
    Z16=NUN./DEN;
    Z1=Z16;
elseif m==15,
    Z15=NUN./DEN;
    Z1=Z15;
elseif m==14,
    Z14=NUN./DEN;
    Z1=Z15;
elseif m==13,
    Z13=NUN./DEN;
    Z1=Z13;
elseif m==12,
    Z12=NUN./DEN;
    Z1=Z12;
elseif m==11,
    Z11=NUN./DEN;
    Z1=Z11;
elseif m==10,
    Z10=NUN./DEN;
    Z1=Z10;
elseif m==9,
    Z9=NUN./DEN;
    Z1=Z9;
elseif m==8,
    Z8=NUN./DEN;
    Z1=Z8;
elseif m==7,
    Z7=NUN./DEN;
    Z1=Z7;
elseif m==6,

```

```

        Z6=NUN./DEN;
        Z1=Z6;
    elseif m==5,
        Z5=NUN./DEN;
        Z1=Z5;
    elseif m==4,
        Z4=NUN./DEN;
        Z1=Z4;
    elseif m==3,
        Z3=NUN./DEN;
        Z1=Z3;
    elseif m==2,
        Z2=NUN./DEN;
        Z1=Z2;
    elseif m==1,
        Z1=NUN./DEN;
    end
end
end
%*****test*****
% for t=l:-1:1;
%     cc1=Zo1(t).*v1(t);
%     CC2=(cc1.*v1(t).*Kr1(t)./(f.*pi)).*((f./fr).^Np1(t));
%     cc=cc1+j.*CC2;
%     Ko1=W./v1(t);
%     K11=Kr1(t).*((f./fr).^Np1(t));
%     g=(K11+j.*(Ko1));
%     Zoo1=cc.*(j.*W);
%     NUN=(Z11+Zoo1.*tanh(g.*a1(t))).*Zoo1;
%     DEN=(Zoo1+Z11.*tanh(g.*a1(t)));
%     if t==2,
%         Z21=NUN./DEN;
%         Z11=Z21;
%     elseif t==1,
%         Z11=NUN./DEN;
%     end
% end
c10=Z1o*vw;
C20=(c10.*vw.*Krr./(f.*pi)).*((f./fr).^Nn);
c=c10+j.*C20;
K00=W./vw;
K10=Krr.*((f./fr).^Nn);
go=(K10+j.*(K00));
Z02=c.*go./(j.*W);
F1=Z02.*cosh(go.*ap)./sinh(go.*ap);
F2=Z02./sinh(go.*ap);
K=h./(j.*W.*A);
%*****
%*CALCUL DE L'IMPEDANCE ELECTRIQUE DU PIEZO
%*****
N=(K.^2).*(Z1+ZA1-2*(F2-F1))*A;
D=F2.^2-F1.^2-Z1.*ZA1-F1.*(Z1+ZA1);
Ze=(N./D-j./(W.*Co));

```

```

ZZ=abs(Ze);
G1=((F1-F2+Z1).*K./D);
G2=((F2-F1-ZA1).*K./D);
Ve=1;
V0=(G1.*Ve./Ze);
V1=(G2.*Ve./Ze);
VV0=abs(V0);
VV1=abs(V1);
%*****
%*CALCUL DE LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR CHAQUE FACE
%*****
for y=1:1:i;
    c1=Zo(y).*v(y);
    CC2=(c1.*v(y).*Kr(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^ Np(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v(y);
    KK1=Kr(y).*((f./fr).^ Np(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zoo=c.*gg./(j*W);
    if y==i,
        Z2=400;
    end
    if y==1,
        Vn=V1.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z2.*sinh(gg.*a(y));
        V2=(Vn./Vd);
        Va2=abs(V2);
    elseif y==2,
        if y==i,
            Z3=400;
        end
        Vn=V2.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z3.*sinh(gg.*a(y));
        V3=(Vn./Vd);
        Va3=abs(V3);
    elseif y==3,
        if y==i,
            Z4=400;
        end
        Vn=V3.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z4.*sinh(gg.*a(y));
        V4=(Vn./Vd);
        Va4=abs(V4);
    elseif y==4,
        if y==i,
            Z5=400;
        end
        Vn=V4.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z5.*sinh(gg.*a(y));
        V5=(Vn./Vd);
        Va5=abs(V5);
    elseif y==5,

```

```

if y==i,
    Z6=400;
end
Vn=V5.*Zoo;
Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z6.*sinh(gg.*a(y));
V6=(Vn./Vd);
Va6=abs(V6);
elseif y==6,
    if y==i,
        Z7=400;
    end
    Vn=V6.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z7.*sinh(gg.*a(y));
    V7=(Vn./Vd);
    Va7=abs(V7);
elseif Y==7,
    if y==i,
        Z8=400;
    end
    Vn=V7.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z8.*sinh(gg.*a(y));
    V8=(Vn./Vd);
    Va8=abs(V8);
elseif Y==8,
    if y==i,
        Z9=400;
    end
    Vn=V8.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z9.*sinh(gg.*a(y));
    V9=(Vn./Vd);
    Va9=abs(V9);
elseif Y==9,
    if y==i,
        Z10=400;
    end
    Vn=V9.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z10.*sinh(gg.*a(y));
    V10=(Vn./Vd);
    Va10=abs(V10);
elseif Y==10,
    if y==i,
        Z11=400;
    end
    Vn=V10.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z11.*sinh(gg.*a(y));
    V11=(Vn./Vd);
    Va11=abs(V11);
elseif y==11,
    if y==i,
        Z12=400;
    end
    Vn=V11.*Zoo;

```

```

    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z12.*sinh(gg.*a(y));
    V12=(Vn./Vd);
    Va12=abs(V12);
    elseif y==12,
        if y==i,
            Z13=400;
        end
        Vn=V12.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z13.*sinh(gg.*a(y));
        V13=(Vn./Vd);
        Va13=abs(V13);
    end
end
npt=length(f);
D=ZZ(2)-ZZ(1);
if D>0
    Mn=[ZZ(1);f(1)];
    Mx=[];
else
    Mx=[ZZ(1);f(1)];
    Mn=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D=ZZ(l+1)-ZZ(l);
    Max=[];
    while D>0 & l+1<npt
        Max=[ZZ(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D=ZZ(l+1)-ZZ(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx=[Mx[ZZ(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx=[Mx Max];
        Min=[];
        while D<0 & l+1<npt
            Min=[ZZ(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D=ZZ(l+1)-ZZ(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn=[Mn[ZZ(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn=[Mn Min];
        end
    end
end
end
H=VV1(2)-VV1(1);
if H>0
    Mn2=[VV1(1);f(1)];
    Mx2=[];

```



```

else
    Mx2=[VV1(1);f(1)];
    Mn2=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    H=VV1(l+1)-VV1(l);
    Ma2=[];
    while H>0 & l+1<npt
        Ma2=[VV1(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        H=VV1(l+1)-VV1(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx2=[Mx2[VV1(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx2=[Mx2 Ma2];
        Mi2=[];
        while H<0 & l+1<npt
            Mi2=[VV1(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            H=VV1(l+1)-VV1(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn2=[Mn2[VV1(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn2=[Mn2 Mi2];
        end
    end
end
H1=VV0(2)-VV0(1);
if H1>0
    Mn1=[VV0(1);f(1)];
    Mx1=[];
else
    Mx1=[VV0(1);f(1)];
    Mn1=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    H1=VV0(l+1)-VV0(l);
    Ma1=[];
    while H1>0 & l+1<npt
        Ma1=[VV0(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        H1=VV0(l+1)-VV0(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx1=[Mx1[VV0(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx1=[Mx1 Ma1];
        Mi1=[];
    end
end

```

```

while H1 < 0 & l+1 < npt
    Mi1 = [VV0(l+1); f(l+1)];
    l = l+1;
    H1 = VV0(l+1) - VV0(l);
end
if l+1 == npt
    Mn1 = [Mn1 [VV0(l+1); f(l+1)]];
else
    Mn1 = [Mn1 Mi1];
end
end
end
for X = 1:i;
    if X == 1
        DD = Va2(2) - Va2(1);
        if DD > 0
            Mnn = [Va2(1); f(1)];
            Mxx = [];
        else
            Mxx = [Va2(1); f(1)];
            Mnn = [];
        end
        l = 2;
        while l+1 < npt
            DD = Va2(l+1) - Va2(l);
            Max = [];
            while DD > 0 & l+1 < npt
                Max = [Va2(l+1); f(l+1)];
                l = l+1;
                DD = Va2(l+1) - Va2(l);
            end
            if l+1 == npt
                Mxx = [Mxx [Va2(l+1); f(l+1)]];
            else
                Mxx = [Mxx Max];
                Min = [];
                while DD < 0 & l+1 < npt
                    Min = [Va2(l+1); f(l+1)];
                    l = l+1;
                    DD = Va2(l+1) - Va2(l);
                end
                if l+1 == npt
                    Mnn = [Mnn [Va2(l+1); f(l+1)]];
                else
                    Mnn = [Mnn Min];
                end
            end
        end
    elseif X == 2
        D12 = Va3(2) - Va3(1);
        if D12 > 0
            Mn12 = [Va3(1); f(1)];

```

```

        Mx12=[];
    else
        Mx12=[Va3(1);f(1)];
        Mn12=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D12=Va3(l+1)-Va3(l);
        Max=[];
        while D12>0 & l+1<npt
            Max=[Va3(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D12=Va3(l+1)-Va3(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx12=[Mx12 Va3(l+1);f(l+1)];
        else
            Mx12=[Mx12 Max];
            Min=[];
            while D12<0 & l+1<npt
                Min=[Va3(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D12=Va3(l+1)-Va3(l);
            end
            if l+1==npt
                Mn12=[Mn12 Va3(l+1);f(l+1)];
            else
                Mn12=[Mn12 Min];
            end
        end
    end
end
end
[X3,X1]=size(Mnn);
[Y4,Y1]=size(Mxx);
[XX3,XX1]=size(Mn12);
[YY4,YY1]=size(Mx12);
%[ee2,nn2]=size(Mx22);
%[qq3,qq2]=size(Mn22);
%[m3,m1]=size(Mx32);
%[p4,p1]=size(Mn32);
%[Q3,Q1]=size(Mx42);
%[r4,r1]=size(Mn42);
[n3,n1]=size(Mx1);
[q4,q1]=size(Mn1);
[e2,n2]=size(Mx2);
[q3,q2]=size(Mn2);
[nn n]=size(Mx);
[qq q]=size(Mn);
fprintf('*****\n')
fprintf('*IMPEDANCE ELECTRIQUE ET VITESSE ACOUSTIQUE [10,9]*\n')
fprintf('*****\n')

```

```

Z=input('VOULEZ L IMPEDANCE ELECTRIQUE (1/0)=')
if Z==1,
    semilogy(f,ZZ)
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE DU PIEZO')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    grid
    pause
    G=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE L IMPEDANCE (1/0)=')
    if G==1
        for K=1:1:n;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxZ=%e\n',Mx(1,K))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx(2,K))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for R=1:1:q;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn(1,R))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn(2,R))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
end
T=input('VITESSE ACOUSTIQUE A DROITE OU A GAUCHE DU PIEZO [10,9]=')
if T==10,
    semilogy(f,VV1)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE A DROITE DU PIEZO [10]')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE [10] (1/0)=')
    if GG==1
        for KK=1:1:n2;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx2(1,KK))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx2(2,KK))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for RR=1:1:q2;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn2(1,RR))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn2(2,RR))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
end
F=input('VITESSE ACOUSTIQUE A GAUCHE DU PIEZO [9] (1/0)=')
if F==1,
    semilogy(f,VV0)

```

```

title('VITESSE ACOUSTIQUE A GAUCHE DU PIEZO [9]')
xlabel('FREQUENCE EN Hz')
ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
grid
pause
G=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE [9] (1/0)=')
if G==1
    for P=1:1:n1;
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx1(1,P))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx1(2,P))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for R=1:1:q1;
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn1(1,R))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn1(2,R))
        fprintf('*****\n')
    end
end
end
end
if T==9,
    semilogy(f,VV0)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE A GAUCHE DU PIEZO [9]')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    K=input('VITESSE ACOUSTIQUE A DROITE DU PIEZO [10]=')
    if K==10,
        semilogy(f,VV1)
        title('VITESSE ACOUSTIQUE A DROITE DU PIEZO [10]')
        xlabel('FREQUENCE EN Hz')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
        grid
        pause
    end
end
end
fprintf('*****\n')
fprintf('*VITESSE ACOSUTIQUE SUR CHAQUE FACE A DROITE*\n')
fprintf('*****\n')
R=input('QUELLE VITESSE ACOUSTIQUE (11,12,13,14,15....N)/0=')
if R==11,
    semilogy(f,Va2)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE [V11]')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE 11 (1/0)=')

```

```

if GG==1
    for KK=1:1:Y1;
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mxx(1,KK))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mxx(2,KK))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for RR=1:1:X1;
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MinV=%e\n',Mnn(1,RR))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mnn(2,RR))
        fprintf('*****\n')
    end
end
if y==1,
    NN=[f' ZZ' VV0' VV1' Va2'];
    WW=input('Voulez les valeurs des variables [Z],[U9],[U10],[U11] (1/0)=')
    format short e
    if WW==1
        fprintf('Freq.      [Z]      [U9]      [U10]      [U11]')
        X=length(f);
        A=0;
        while A ~ =X
            for l=1:1:4
                A=A+1;
                Q=[f(1,A)' ZZ(1,A)' VV0(1,A)' VV1(1,A)' Va2(1,A)']
                if A==X
                    break
                end
            end
            end
            pause
            end
        end
        fprintf('Touchez [Ctrl p] pour activer et desactiver l imprimante\n')
        E=input('Voulez sortir les valeurs [Z],[U9],[U10],[U11] par l imprimante (1/0)=')
        if E==1
            if C==31
                tesis31
            end
            if C==32
                tesis32
            end
            end
            fprintf('*****\n')
            fprintf('*   VALEURS [Z],[U9],[U10],[U11]   *\n')
            fprintf('*****\n')
            fprintf('Freq.(Hz)   [Z en Ohms]   [U9 m/s]   [U10 m/s]   [U11 m/s]')
            NN
        end
        end
        fprintf('Touchez enter')
        pause
        fprintf('Touchez [Ctrl p] pour activer et desactiver l imprimante\n')

```

```

K=input('Voulez sortir les valeurs Max-Min par l imprimante (1/0)=')
if K==1
    if C==31
        tesis31
    end
    if C==32
        tesis32
    end
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*      VALEUR MAX-MIN      *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MAX-IMPEDANCE ELECTRIQUE\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('[Z(Ohms)      Freq(Hz)']
    fprintf('*****\n')
    Mx'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MIN-IMPEDANCE ELECTRIQUE\n')
    fprintf('*****\n')
    Mn'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MAX-VITESSE [U9(m/s)]')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('[U9      Freq.\n')
    fprintf('*****\n')
    Mx1'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MIN-VITESSE [U9(m/s)]')
    fprintf('*****\n')
    Mn1'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MAX-VITESSE [U10(m/s)]')
    fprintf('*****\n')
    Mx2'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MIN-VITESSE [U10(m/s)]')
    fprintf('*****\n')
    Mn2'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MAX-VITESSE [U11(m/s)]')
    fprintf('*****\n')
    Mxx'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('MIN-VITESSE [U11(m/s)]')
    fprintf('*****\n')
    Mnn'
    fprintf('*****\n')
end
break
end
RR=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE 12 (1/0)=')
if RR==1,

```

```

semilogy(f,Va3)
title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 12')
xlabel('FREQUENCE EN Hz')
ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
grid
pause
GG=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE (1/0)=')
if GG==1
    for KK=1:1:YY1;
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx12(1,KK))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx12(2,KK))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for RR=1:1:XX1;
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MinV=%e\n',Mn12(1,RR))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn12(2,RR))
        fprintf('*****\n')
    end
end
if y==2,
    NN=[f' ZZ' VV0' VV1' Va2' Va3'];
    WW=input('Voulez les valeurs des variables [Z],[U9],[U10],[U11],[U12] (1/0)=')
    format short e
    if WW==1
        fprintf('Freq(Hz)      [Z(Ohms)] [U9(m/s)] [U10(m/s)] [U11(m/s)] [U12(m/s)]')
        X=length(f);
        A=0;
        while A~=X
            for l=1:1:4
                A=A+1;
                Q=[f(1,A)' ZZ(1,A)' VV0(1,A)' VV1(1,A)' Va2(1,A)' Va3(1,A)']
                if A==X
                    break
                end
            end
        end
        pause
    end
end
fprintf('Touchez [Ctrl-p] pour activer et desactiver l imprimante\n')
E=input('Voulez sortir les valeurs [Z],[U9],[U10],[U11] par l imprimante (1/0)=')
if E==1
    if C==41
        tesis41
    end
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*   VALEURS [Z],[U9],[U10],[U11]      *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('Freq(Hz)      [Z(Ohms)]      [U9(m/s)] [U10(m/s)] [U11(m/s)] [U12(m/s)]')
    NN

```



```

end
fprintf('Touchez enter')
fprintf('Touchez [Ctrl p] pour activer et desactiver l imprimante\n')
K=input('Voulez sortir les valeurs Max-Min par l imprimante (1/0)=')
if K==1
    if C==41
        tesis41
    end
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*      VALEURS MAX-MIN      *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*MAX- IMPEDANCE ELECTRIQUE*\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*[Z(Ohms)]      Freq(Hz)*\n')
    fprintf('*****\n')
    Mx'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*MIN-IMPEDANCE ELECTRIQUE*\n')
    fprintf('*****\n')
    Mn'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MAX-VITESSE [U9]      *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('[U9(m/s)]      Freq(Hz) \n')
    fprintf('*****\n')
    Mx1'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MIN-VITESSE [U9]      *\n')
    fprintf('*****\n')
    Mn1'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MAX-VITESSE [U10]     *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('[U10(m/s)]      Freq(Hz) \n')
    fprintf('*****\n')
    Mx2'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MIN-VITESSE [U10]     *\n')
    fprintf('*****\n')
    Mn2'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MAX-VITESSE [U11]     *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('[U11(m/s)]      Freq(Hz) \n')
    fprintf('*****\n')
    Mxx'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MIN-VITESSE [U11]     *\n')
    fprintf('*****\n')
    Mnn'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MAX-VITESSE [U12]     *\n')

```

```

    fprintf('*****\n')
    fprintf('[U12(m/s)]      Freq(Hz) \n')
    fprintf('*****\n')
    Mx12'
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* MIN-VITESSE [U12] *\n')
    fprintf('*****\n')
    Mn12'
    fprintf('*****\n')
end
break
end
if RR==0,
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
    pause(1)
    break
end
if R==0,
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
    break
end
G=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 13 =')
if G==13,
    semilogy(f,Va4)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 13')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    if y==i,
        fprintf('FIN DE CALCUL\n')
        pause
        break
    end
end
GG=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 14=')
if GG==14,
    semilogy(f,Va5)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 14')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    if y==i,
        fprintf('FIN DE CALCUL\n')
        pause
        break
    end
end
end
end
end
end

```

```

%*****
%*ALGORITHME DE COUCHES A GAUCHE ET A DROITE*
%*****
if E==2,
W=2*pi*f;
for K=ia:-1:1;
    c1=Zao(K).*va(K);
    C2=(c1.*va(K)*Kra(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(K));
    c=c1+j.*C2;
    Koa=W./va(K);
    K1a=Kra(K).*((f./fr).^Nap(K));
    ga=(K1a+j.*(Koa));
    Zoo=c.*ga./(j.*W);
    NUNa=(ZA1+Zoo.*tanh(ga.*aa(K))).*Zoo;
    DENa=(Zoo+ZA1.*tanh(ga.*aa(K)));
    if K==20,
        Za20=NUNa./DENa;
        ZA1=Za20;
    elseif K==19,
        Za19=NUNa./DENa;
        ZA1=Za19;
    elseif K==18,
        Za18=NUNa./DENa;
        ZA1=Za18;
    elseif K==17,
        Za17=NUNa./DENa;
        ZA1=Za17;
    elseif K==16,
        Za16=NUNa./DENa;
        ZA1=Za16;
    elseif K==15,
        Za15=NUNa./DENa;
        ZA1=Za15;
    elseif K==14,
        Za14=NUNa./DENa;
        ZA1=Za14;
    elseif K==13,
        Za13=NUNa./DENa;
        ZA1=Za13;
    elseif K==12,
        Za12=NUNa./DENa;
        ZA1=Za12;
    elseif K==11,
        Za11=NUNa./DENa;
        ZA1=Za11;
    elseif K==10,
        Za10=NUNa./DENa;
        ZA1=Za10;
    elseif K==9,
        Za9=NUNa./DENa;
        ZA1=Za9;
    elseif K==8,

```

```

    Za8=NUNa./DENa;
    ZA1=Za8;
elseif K==7,
    Za7=NUNa./DENa;
    ZA1=Za7;
elseif K==6,
    Za6=NUNa./DENa;
    ZA1=Za6;
elseif K==5,
    Za5=NUNa./DENa;
    ZA1=Za5;
elseif K==4,
    Za4=NUNa./DENa;
    ZA1=Za4;
elseif K==3,
    Za3=NUNa./DENa;
    ZA1=Za3;
elseif K==2,
    Za2=NUNa./DENa;
    ZA1=Za2;
elseif K==1,
    Za1=NUNa./DENa;
    ZA1=Za1;
end
end
for m=i:-1:1;
    c1=Zo(m).*v(m);
    C2=(c1.*v(m).*Kr(m)./(f.*pi)).*((f./fr).^ Np(m));
    c=c1+j.*C2;
    Ko=W./v(m);
    K1=Kr(m).*((f./fr).^ Np(m));
    g=(K1+j.*(Ko));
    Zoo=c.*g./(j.*W);
    NUN=(Z1+Zoo.*tanh(g.*a(m))).*Zoo;
    DEN=(Zoo+Z1.*tanh(g.*a(m)));
    if m==20,
        Z20=NUN./DEN;
        Z1=Z20;
    elseif m==19
        Z19=NUN./DEN;
        Z1=Z19;
    elseif m==18,
        Z18=NUN./DEN;
        Z1=Z18;
    elseif m==17,
        Z17=NUN./DEN;
        Z1=Z17;
    elseif m==16,
        Z16=NUN./DEN;
        Z1=Z16;
    elseif m==15,
        Z15=NUN./DEN;

```

```

    Z1=Z15;
elseif m==14,
    Z14=NUN./DEN;
    Z1=Z14;
elseif m==13,
    Z13=NUN./DEN;
    Z1=Z13;
elseif m==12,
    Z12=NUN./DEN;
    Z1=Z12;
elseif m==11,
    Z11=NUN./DEN;
    Z1=Z11;
elseif m==10,
    Z10=NUN./DEN;
    Z1=Z10;
elseif m==9,
    Z9=NUN./DEN;
    Z1=Z9;
elseif m==8,
    Z8=NUN./DEN;
    Z1=Z8;
elseif m==7,
    Z7=NUN./DEN;
    Z1=Z7;
elseif m==6,
    Z6=NUN./DEN;
    Z1=Z6;
elseif m==5,
    Z5=NUN./DEN;
    Z1=Z5;
elseif m==4,
    Z4=NUN./DEN;
    Z1=Z4;
elseif m==3,
    Z3=NUN./DEN;
    Z1=Z3;
elseif m==2
    Z2=NUN./DEN;
    Z1=Z2;
elseif m==1
    Z1=NUN./DEN;
end
end
c1o=Z1o*w;
C20=(c1o.*wv.*Krr./((f.*pi)).*((f./fr).^Nn);
%Z02=(Z1o.*(1+j*(C20./(2.*c1o))));
c=c1o+j.*C20;
K00=W./w;
K10=Krr.*((f./fr).^Nn);
go=(K10+j.*(K00));
Z02=c.*go./(j*W);

```

```

F1=Z02.*cosh(go.*ap)./sinh(go.*ap);
F2=Z02./sinh(go.*ap);
K=h./(j.*W.*A);
%*****
%Calcul de l'impedance
%*****
%Numerateur de l'impedance premiere partie
%*****
N=(K.^2).*(Z1+ZA1-2*(F2-F1))*A;
%*****
%Denominateur de l'impedance premiere partie
%*****
D=F2.^2-F1.^2-Z1.*ZA1-F1.*(Z1+ZA1);
%*****
Ze=(N./D-j./(W.*Co));
ZZ=abs(Ze);
%*****
%*Expressions de la vitesse acoustique
%*****
G1=((F1-F2+Z1).*K./D);
G2=((F2-F1-ZA1).*K./D);
%Zi=R+j*X;
%Ve=V.*Ze./(Ze+Zi);
Ve=1;
V0=(G1.*Ve./Ze);
V1=(G2.*Ve./Ze);
VV0=abs(V0);
VV1=abs(V1);
%*****
%*CALCUL DE LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR CHAQUE FACE
%*****
for y=1:1:i;
    c1=Zo(y).*v(y);
    CC2=(c1.*v(y).*Kr(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Np(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v(y);
    KK1=Kr(y).*((f./fr).^Np(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zoo=c.*gg./(j.*W);
    if y==i,
        Z2=ZM;
    end
    if y==1,
        Vn=V1.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z2.*sinh(gg.*a(y));
        V2=(Vn./Vd);
        Va2=abs(V2);
    elseif y==2,
        if y==i,
            Z3=ZM;
        end
        Vn=V2.*Zoo;

```

```

Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z3.*sinh(gg.*a(y));
V3=(Vn./Vd);
Va3=abs(V3);
elseif y==3,
    if y==i,
        Z4=ZM;
    end
    Vn=V3.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z4.*sinh(gg.*a(y));
    V4=(Vn./Vd);
    Va4=abs(V4);
elseif y==4,
    if y==i,
        Z5=ZM;
    end
    Vn=V4.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z5.*sinh(gg.*a(y));
    V5=(Vn./Vd);
    Va5=abs(V5);
elseif y==5,
    if y==i,
        Z6=ZM;
    end
    Vn=V5.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z6.*sinh(gg.*a(y));
    V6=(Vn./Vd);
    Va6=abs(V6);
elseif y==6,
    if y==i,
        Z7=ZM;
    end
    Vn=V6.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z7.*sinh(gg.*a(y));
    V7=(Vn./Vd);
    Va7=abs(V7);
elseif y==7,
    if y==i,
        Z8=ZM;
    end
    Vn=V7.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z8.*sinh(gg.*a(y));
    V8=(Vn./Vd);
    Va8=abs(V8);
elseif y==8,
    if y==i,
        Z9=ZM;
    end
    Vn=V8.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z9.*sinh(gg.*a(y));
    V9=(Vn./Vd);
    Va9=abs(V9);
elseif y==9,

```

```

    if y==i,
        Z10=ZM;
    end
    Vn=V9.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z10.*sinh(gg.*a(y));
    V10=(Vn./Vd);
    Va10=abs(V10);
elseif y==10,
    if y==i,
        Z11=ZM;
    end
    Vn=V10.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(y))+Z11.*sinh(gg.*a(y));
    V11=(Vn./Vd);
    Va11=abs(V11);
end
end
npt=length(f);
D=ZZ(2)-ZZ(1);
if D>0
    Mn=[ZZ(1);f(1)];
    Mx=[];
else
    Mx=[ZZ(1);f(1)];
    Mn=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D=ZZ(l+1)-ZZ(l);
    Max=[];
    while D>0 & l+1<npt
        Max=[ZZ(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D=ZZ(l+1)-ZZ(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx=[Mx[ZZ(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx=[Mx Max];
        Min=[];
        while D<0 & l+1<npt
            Min=[ZZ(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D=ZZ(l+1)-ZZ(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn=[Mn[ZZ(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn=[Mn Min];
        end
    end
end
end
end

```



```

H=VV1(2)-VV1(1);
if H>0
    Mn2=[VV1(1);f(1)];
    Mx2=[];
else
    Mx2=[VV1(1);f(1)];
    Mn2=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    H=VV1(l+1)-VV1(l);
    Ma2=[];
    while H>0 & l+1<npt
        Ma2=[VV1(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        H=VV1(l+1)-VV1(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx2=[Mx2[VV1(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx2=[Mx2 Ma2];
        Mi2=[];
        while H<0 & l+1<npt
            Mi2=[VV1(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            H=VV1(l+1)-VV1(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn2=[Mn2[VV1(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn2=[Mn2 Mi2];
        end
    end
end
H1=VV0(2)-VV0(1);
if H1>0
    Mn1=[VV0(1);f(1)];
    Mx1=[];
else
    Mx1=[VV0(1);f(1)];
    Mn1=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    H1=VV0(l+1)-VV0(l);
    Ma1=[];
    while H1>0 & l+1<npt
        Ma1=[VV0(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        H1=VV0(l+1)-VV0(l);
    end
    if l+1==npt

```

```

    Mx1=[Mx1[VV0(l+1);f(l+1)]];
else
Mx1=[Mx1 Ma1];
Mi1=[];
while H1<0 & l+1<npt
    Mi1=[VV0(l+1);f(l+1)];
    l=l+1;
    H1=VV0(l+1)-VV0(l);
end
if l+1==npt
    Mn1=[Mn1[VV0(l+1);f(l+1)]];
else
Mn1=[Mn1 Mi1];
end
end
end
for X=1:1:i;
if X==1
    D11=Va2(2)-Va2(1);
    if D11>0
        Mn11=[Va2(1);f(1)];
        Mx11=[];
    else
        Mx11=[Va2(1);f(1)];
        Mn11=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D11=Va2(l+1)-Va2(l);
        Max=[];
        while D11>0 & l+1<npt
            Max=[Va2(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D11=Va2(l+1)-Va2(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx11=[Mx11[Va2(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mx11=[Mx11 Max];
            Min=[];
            while D11<0 & l+1<npt
                Min=[Va2(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D11=Va2(l+1)-Va2(l);
            end
            if l+1==npt
                Mn11=[Mn11[Va2(l+1);f(l+1)]];
            else
                Mn11=[Mn11 Min];
            end
        end
    end
end
end

```

```

elseif X==2
    D12=Va3(2)-Va3(1);
    if D12>0
        Mn12=[Va3(1);f(1)];
        Mx12=[];
    else
        Mx12=[Va3(1);f(1)];
        Mn12=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D12=Va3(l+1)-Va3(l);
        Max=[];
        while D12>0 & l+1<npt
            Max=[Va3(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D12=Va3(l+1)-Va3(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx12=[Mx12 Va3(l+1);f(l+1)];
        else
            Mx12=[Mx12 Max];
            Min=[];
            while D12<0 & l+1<npt
                Min=[Va3(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D12=Va3(l+1)-Va3(l);
            end
            if l+1==npt
                Mn12=[Mn12 Va3(l+1);f(l+1)];
            else
                Mn12=[Mn12 Min];
            end
        end
    end
end
elseif X==3
    D13=Va4(2)-Va4(1);
    if D13>0
        Mn13=[Va4(1);f(1)];
        Mx13=[];
    else
        Mx13=[Va4(1);f(1)];
        Mn13=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D13=Va4(l+1)-Va4(l);
        Max=[];
        while D13>0 & l+1<npt
            Max=[Va4(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D13=Va4(l+1)-Va4(l);
        end
    end
end

```

```

end
if l+1==npt
    Mx13=[Mx13[Va4(l+1);f(l+1)]];
else
    Mx13=[Mx13 Max];
    Min=[];
    while D13<0 & l+1<npt
        Min=[Va4(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D13=Va4(l+1)-Va4(l);
    end
    if l+1==npt
        Mn13=[Mn13[Va4(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mn13=[Mn13 Min];
    end
end
end
elseif X==4
    D14=Va5(2)-Va5(1);
    if D14>0
        Mn14=[Va5(1);f(1)];
        Mx14=[];
    else
        Mx14=[Va5(1);f(1)];
        Mn14=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D14=Va5(l+1)-Va5(l);
        Max=[];
        while D14>0 & l+1<npt
            Max=[Va5(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D14=Va5(l+1)-Va5(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx14=[Mx14[Va5(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mx14=[Mx14 Max];
            Min=[];
            while D14<0 & l+1<npt
                Min=[Va5(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D14=Va5(l+1)-Va5(l);
            end
            if l+1==npt
                Mn14=[Mn14[Va5(l+1);f(l+1)]];
            else
                Mn14=[Mn14 Min];
            end
        end
    end
end

```

```

end
elseif X==5
    D15=Va6(2)-Va6(1);
    if D15>0
        Mn15=[Va6(1);f(1)];
        Mx15=[];
    else
        Mx15=[Va6(1);f(1)];
        Mn15=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D15=Va6(l+1)-Va6(l);
        Max=[];
        while D15>0 & l+1<npt
            Max=[Va6(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D15=Va6(l+1)-Va6(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx15=[Mx15 Va6(l+1);f(l+1)];
        else
            Mx15=[Mx15 Max];
            Min=[];
            while D15<0 & l+1<npt
                Min=[Va6(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D15=Va6(l+1)-Va6(l);
            end
            if l+1==npt
                Mn15=[Mn15 Va6(l+1);f(l+1)];
            else
                Mn15=[Mn15 Min];
            end
        end
    end
end
elseif X==6
    D16=Va7(2)-Va7(1);
    if D16>0
        Mn16=[Va7(1);f(1)];
        Mx16=[];
    else
        Mx16=[Va7(1);f(1)];
        Mn16=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D16=Va7(l+1)-Va7(l);
        Max=[];
        while D16>0 & l+1<npt
            Max=[Va7(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;

```

```

        D16=Va7(l+1)-Va7(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx16=[Mx16 Va7(l+1);f(l+1)];
    else
        Mx16=[Mx16 Max];
        Min=[];
        while D16<0 & l+1<npt
            Min=[Va7(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D16=Va7(l+1)-Va7(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn16=[Mn16 Va7(l+1);f(l+1)];
        else
            Mn16=[Mn16 Min];
        end
    end
end
elseif X==7
    D17=Va8(2)-Va8(1);
    if D17>0
        Mn17=[Va8(1);f(1)];
        Mx17=[];
    else
        Mx17=[Va8(1);f(1)];
        Mn17=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D17=Va8(l+1)-Va8(l);
        Max=[];
        while D17>0 & l+1<npt
            Max=[Va8(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D17=Va8(l+1)-Va8(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx17=[Mx17 Va8(l+1);f(l+1)];
        else
            Mx17=[Mx17 Max];
            Min=[];
            while D17<0 & l+1<npt
                Min=[Va8(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D17=Va8(l+1)-Va8(l);
            end
            if l+1==npt
                Mn17=[Mn17 Va8(l+1);f(l+1)];
            else
                Mn17=[Mn17 Min];
            end
        end
    end
end

```

```

        end
    end
elseif X==8
    D18=Va9(2)-Va9(1);
    if D18>0
        Mn18=[Va9(1);f(1)];
        Mx18=[];
    else
        Mx18=[Va9(1);f(1)];
        Mn18=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D=Va9(l+1)-Va9(l);
        Max=[];
        while D18>0 & l+1<npt
            Max=[Va9(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D18=Va9(l+1)-Va9(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx18=[Mx18 Va9(l+1);f(l+1)];
        else
            Mx18=[Mx18 Max];
            Min=[];
            while D18<0 & l+1<npt
                Min=[Va9(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D18=Va9(l+1)-Va9(l);
            end
            if l+1==npt
                Mn18=[Mn18 Va9(l+1);f(l+1)];
            else
                Mn18=[Mn18 Min];
            end
        end
    end
end
end
[nn3,nn1]=size(Mx11);
[qq4,qq1]=size(Mn11);
[ee,nn3]=size(Mx12);
[ee2,nn2]=size(Mn12);
[qq3,qq2]=size(Mx13);
[mm,mm1]=size(Mn13);
[p,s]=size(Mx14);
[b,b1]=size(Mn14);
[c,c1]=size(Mx15);
[d,d1]=size(Mn15);
[e,e8]=size(Mx16);
[f2,f1]=size(Mn16);
[g,g1]=size(Mx17);

```

```

[h,h1]=size(Mn17);
[i,i1]=size(Mx18);
[j,j1]=size(Mn18);
[n3,n1]=size(Mx1);
[q4,q1]=size(Mn1);
[e9,n2]=size(Mx2);
[q3,q2]=size(Mn2);
[nn n]=size(Mx);
[qq q]=size(Mn);
%projet1
Q=input('VOULEZ L IMPEDANCE ELECTRIQUE OU LA VITESSE ACOUSTIQUE (1/0)=')
if Q==1,
    semilogy(f,ZZ)
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE DU PIEZO')
    xlabel('FREQUENCE EN KHz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    grid
    pause
end
G=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE L IMPEDANCE (1/0)=')
if G==1
    for K=1:1:n;
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MaxZ=%e\n',Mx(1,K))
        fprintf('VALEUR Freq=%E\n',Mx(2,K))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for R=1:1:q;
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn(1,R))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn(2,R))
        fprintf('*****\n')
    end
end
T=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE A [10] OU [9] (1/0)=')
if T==1,
    semilogy(f,VV1)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE [10] ')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE [10] (1/0)=')
    if GG==1
        for KK=1:1:n2;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx2(1,KK))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx2(2,KK))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
    end
end

```



```

for RR=1:1:q2;
    fprintf('*****\n')
    fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn2(1,RR))
    fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn2(2,RR))
    fprintf('*****\n')
end
end
CC=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE [9] (1/0)=')
if CC==0,
    fprintf('FIN DE CALCUL')
    pause
    break
end
if CC==1,
    semilogy(f,VV0)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE [9]')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE [9](1/0)=')
    if GG==1
        for KK=1:1:n1;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx1(1,KK))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx1(2,KK))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for RR=1:1:q1;
            fprintf('*****\n')
            fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn1(1,RR))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn1(2,RR))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
end
end
end
if T==0,
    semilogy(f,VV0)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE [9] ')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    E=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE [10] DROITE (1/0)=')
    if E==1,
        semilogy(f,VV1)
        title('VITESSE ACOUSTIQUE [10]')
        xlabel('FREQUENCE EN Hz')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
        grid
    end
end

```

```

    pause
    if E==0,
        fprintf('FIN DE CALCUL')
        pause
    end
end
end
if Q==0,
    S=input('VITESSE ACOUSTIQUE [10] OU [9] (1/0)=')
    if S==1,
        semilogy(f,VV1)
        title('VITESSE ACOUSTIQUE [10]')
        xlabel('FREQUENCE EN Hz')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
        grid
        pause
    end
    if S==0,
        semilogy(f,VV0)
        title('VITESSE ACOUSTIQUE [9] ')
        xlabel('FREQUENCE EN Hz')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
        grid
        pause
    end
end
W1=input('VOULEZ LES VITESSES ACOUSTIQUES A DROITE (1/0)=')
if W1==1
    GG=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 11 (1/0)=')
    if GG==1,
        semilogy(f,Va2)
        title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 11')
        xlabel('FREQUENCE EN Hz')
        ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
        grid
        pause
        GG=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE [11] (1/0)=')
        if GG==1
            for KK=1:1:nn1;
                fprintf('*****VALEUR Max*****\n')
                fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx11(1,KK))
                fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx11(2,KK))
                fprintf('*****\n')
            end
            pause
            for RR=1:1:qq1;
                fprintf('*****VALEUR Min*****\n')
                fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn11(1,RR))
                fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn11(2,RR))
                fprintf('*****\n')
            end
        end
    end
end
end

```

```

if y==1,
    fprintf('FIN DE CALCUL POUR LES VITESSES A DROITE\n')
    WW=input('VOULEZ LES VITESSES ACOUSTIQUES A GAUCHES (1/0)=')
    if WW==1
        projet1
        prog
    end
    break
end
end
GG=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 12 (1/0)=')
if GG==1,
    semilogy(f,Va3)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 12')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/S')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE [12] (1/0)=')
    if GG==1
        for KK=1:1:nn3;
            fprintf('*****VALEUR Max*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx12(1,KK))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx12(2,KK))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for RR=1:1:nn2;
            fprintf('*****VALEUR Min*****\n')
            fprintf('VALEUR MinZ=%e\n',Mn12(1,RR))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn12(2,RR))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
end
if y==2,
    fprintf('FIN DE CALCUL POUR LES VITESSES A DROITE\n')
    WW=input('VOULEZ LES VITESSES ACOUSTIQUES A GAUCHE (1/0)=')
    if WW==1
        projet1
        prog
    end
    break
end
end
GG=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 13 (1/0)=')
if GG==1,
    semilogy(f,Va4)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 13')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause

```

```

GG=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE [13] (1/0)=')
if GG==1
    for KK=1:1:qq2;
        fprintf('*****VALEUR Max*****\n')
        fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx13(1,KK))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx13(2,KK))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for RR=1:1:mm1;
        fprintf('*****VALEUR Min*****\n')
        fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mn13(1,RR))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn13(2,RR))
        fprintf('*****\n')
    end
end
if y==3,
    fprintf('FIN DE CALCUL POUR LES VITESSES A DROITE\n')
    WW=input('VOULEZ LES VITESSES ACOUSTIQUES A GAUCHE (1/0)=')
    if WW==1
        projet1
        prog
    end
    break
end
end
WW=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 14 (1/0)=')
if WW==1,
    semilogy(f,Va5)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 14')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS Max-Min DE LA VITESSE [14] (1/0)=')
    if GG==1
        for KK=1:1:s;
            fprintf('*****VALEUR MAX*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx14(1,KK))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx14(2,KK))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for RR=1:1:b1;
            fprintf('*****VALEUR MIN*****\n')
            fprintf('VALEUR MinV=%e\n',Mn14(1,RR))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn14(2,RR))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
end
if y==4,
    fprintf('FIN DE CALCUL POUR LES VITESSES A DROITE\n')

```

```

WW=input('VOULEZ LES VITESSES ACOUSTIQUES A GAUCHE (1/0)=')
if WW==1
    projet1
    prog
end
break
end
end
GG=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 15 (1/0)=')
if GG==1,
    semilogy(f,Va6)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 15')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS MAX-MIN DE LA VITESSE [15] (1/0)=')
    if GG==1
        for KK=1:1:c1;
            fprintf('*****VALEUR MAX*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx15(1,KK))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx15(2,KK))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for RR=1:1:d1;
            fprintf('*****VALEUR MIN*****\n')
            fprintf('VALEUR MinV=%e\n',Mn15(1,RR))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn15(2,RR))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
end
if y==5,
    fprintf('FIN DE CALCUL POUR LES VITESSES A DROITE\n')
    WW=input('VOULEZ LES VITESSES ACOUSTIQUES A GAUCHE (1/0)=')
    if WW==1
        projet1
        prog
    end
    break
end
end
XX=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 16 (1/0)= ')
if XX==1,
    semilogy(f,Va7)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 16')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS MAX-MIN DE LA VITESSE [16] (1/0)=')
    if GG==1

```

```

for KK=1:1:e8;
    fprintf('*****VALEUR MAX*****\n')
    fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx16(1,KK))
    fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx16(2,KK))
    fprintf('*****\n')
end
pause
for RR=1:1:f1;
    fprintf('*****VALEUR MIN*****\n')
    fprintf('VALEUR MinV=%e\n',Mn16(1,RR))
    fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn16(2,RR))
    fprintf('*****\n')
end
end
if y==6,
    fprintf('FIN DE CALCUL POUR LES VITESSES A DROITE\n')
    WW=input('VOULEZ LES VITESSES ACOUSTIQUES A GAUCHE (1/0)=')
    if WW==1
        projet1
        prog
    end
    break
end
end
V=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 17 (1/0)=')
if V==1,
    semilogy(f,Va8)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 17')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS MAX-MIN DE LA VITESSE [17] (1/0)=')
    if GG==1
        for KK=1:1:g1;
            fprintf('*****VALEUR MAX*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx17(1,KK))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx17(2,KK))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for RR=1:1:h1
            fprintf('*****VALEUR MIN*****\n')
            fprintf('VALEUR MinV=%e\n',Mn17(1,RR))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn17(2,RR))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
end
if y==7,
    fprintf('FIN DE CALCUL POUR LES VITESSES A DROITE\n')
    WW=input('VOULEZ LES VITESSES ACOUSTIQUES A GAUCHE (1/0)=')
    if WW==1

```

```

        projet1
        prog
    end
    break
end
end
VV=input('VOULEZ LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 18 (1/0)=')
if VV==1,
    semilogy(f,Va9)
    title('VITESSE ACOUSTIQUE SUR LA FACE 18')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    grid
    pause
    GG=input('VOULEZ LES VALEURS MAX-MIN DE LA VITESSE [18]=')
    if GG==1
        for KK=1:1:i1;
            fprintf('*****VALEUR MAX*****\n')
            fprintf('VALEUR MaxV=%e\n',Mx18(1,KK))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx18(2,KK))
            fprintf('*****\n')
        end
        pause
        for RR=1:1:j1;
            fprintf('*****VALEUR MIN*****\n')
            fprintf('VALEUR MinV=%e\n',Mn18(1,RR))
            fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn18(2,RR))
            fprintf('*****\n')
        end
    end
end
if y==8,
    fprintf('FIN DE CALCUL POUR LES VITESSES A DROITE\n')
    WW=input('VOULEZ LES VITESSES ACOUSTIQUES A GAUCHE (1/0)=')
    if WW==1
        projet1
        prog
    end
    break
end
end
if pp==0
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
    break
end
end
end
end

```

```

%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL POUR VITESSES A GAUCHE DU PIEZO.
%*****
fprintf('*****\n')
fprintf('*  CALCUL EN COURS          *\n')
fprintf('*****\n')
%Zb=400;
for K=1:1:ia;
    c1=Zao(K).*va(K);
    CC2=(c1.*va(K).*Kra(K)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nap(K));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./va(K);
    KK1=Kra(K).*((f./fr). ^ Nap(K));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zoo=c.*gg./(j*W);
    %if K==ia,
    %  Za2=Zn;
    %end
    if K==1,
        Vn=V0.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*aa(K))+Za2.*sinh(gg.*aa(K));
        V8=(Vn./Vd);
        Va8=V8;
        V=V8;
        %complex
        %Arg14=Y.*180./pi;
    elseif K==2,
        if K==ia,
            Za3=Zb;
        end
        Vn=V8.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*aa(K))+Za3.*sinh(gg.*aa(K));
        V7=(Vn./Vd);
        Va7=V7;
        V=V7;
        %complex
        %Arg15=Y.*180./pi;
    elseif K==3,
        if K==ia,
            Za4=Zb;
        end
        Vn=V7.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*aa(K))+Za4.*sinh(gg.*aa(K));
        V66=(Vn./Vd);
        Va6=V66;
        V=V66;
        %complex
        %Arg16=Y.*180./pi;
    elseif K==4,

```



```

    if K==ia
        Za5=Zb;
    end
    Vn=V66.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(gg.*aa(K))+Za5.*sinh(gg.*aa(K));
    Vz5=(Vn./Vd);
    Va5=Vz5;
    V=Vz5;
    %complex
    %Arg17=Y.*180./pi;
end
end
npt=length(f);
for X=1:1:ia;
    if X==1
        D8=Va8(2)-Va8(1);
        if D8>0
            Mn8=[Va8(1);f(1)];
            Mx8=[];
        else
            Mx8=[Va8(1);f(1)];
            Mn8=[];
        end
        l=2;
        while l+1<npt
            D8=Va8(l+1)-Va8(l);
            Max=[];
            while D8>0 & l+1<npt
                Max=[Va8(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D8=Va8(l+1)-Va8(l);
            end
            if l+1==npt
                Mx8=[Mx8 Va8(l+1);f(l+1)];
            else
                Mx8=[Mx8 Max];
                Min=[];
                while D8<0 & l+1<npt
                    Min=[Va8(l+1);f(l+1)];
                    l=l+1;
                    D8=Va8(l+1)-Va8(l);
                end
                if l+1==npt
                    Mn8=[Mn8 Va8(l+1);f(l+1)];
                else
                    Mn8=[Mn8 Min];
                end
            end
        end
    end
end

```

```

elseif X==2
    D7=Va7(2)-Va7(1);
    if D7>0
        Mn7=[Va7(1);f(1)];
        Mx7=[];
    else
        Mx7=[Va7(1);f(1)];
        Mn7=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D7=Va7(l+1)-Va7(l);
        Max=[];
        while D7>0 & l+1<npt
            Max=[Va7(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D7=Va7(l+1)-Va7(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx7=[Mx7 Va7(l+1);f(l+1)];
        else
            Mx7=[Mx7 Max];
            Min=[];
            while D7<0 & l+1<npt
                Min=[Va7(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D7=Va7(l+1)-Va7(l);
            end
            if l+1==npt
                Mn7=[Mn7 Va7(l+1);f(l+1)];
            else
                Mn7=[Mn7 Min];
            end
        end
    end
elseif X==3
    D6=Va6(2)-Va6(1);
    if D6>0
        Mn6=[Va6(1);f(1)];
        Mx6=[];
    else
        Mx6=[Va6(1);f(1)];
        Mn6=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D6=Va6(l+1)-Va6(l);
        Max=[];
        while D6>0 & l+1<npt

```

```

        Max=[Va6(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D6=Va6(l+1)-Va6(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx6=[Mx6[Va6(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx6=[Mx6 Max];
        Min=[];
        while D6<0 & l+1<npt
            Min=[Va6(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D6=Va6(l+1)-Va6(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn6=[Mn6[Va6(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn6=[Mn6 Min];
        end
    end
end
elseif X==4
    D5=Va5(2)-Va5(1);
    if D5>0
        Mn5=[Va5(1);f(1)];
        Mx5=[];
    else
        Mx5=[Va5(1);f(1)];
        Mn5=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D5=Va5(l+1)-Va5(l);
        Max=[];
        while D5>0 & l+1<npt
            Max=[Va5(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D5=Va5(l+1)-Va5(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx5=[Mx5[Va5(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mx5=[Mx5 Max];
            Min=[];
            while D5<0 & l+1<npt
                Min=[Va5(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D5=Va5(l+1)-Va5(l);
            end
        end
    end
end

```

```

        if l+1==npt
            Mn5=[Mn5[Va5(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn5=[Mn5 Min];
        end
    end
end
end
end
[a1,a2]=size(Mn5);
[a3,a4]=size(Mx5);
[e1,e2]=size(Mn6);
[e3,e4]=size(Mx6);
[e5,e6]=size(Mn7);
[e7,e8]=size(Mx7);
[e9,e10]=size(Mn8);
[e11,e12]=size(Mx8);
end

```

Organigramme de la boucle de deux éléments piézoélectriques

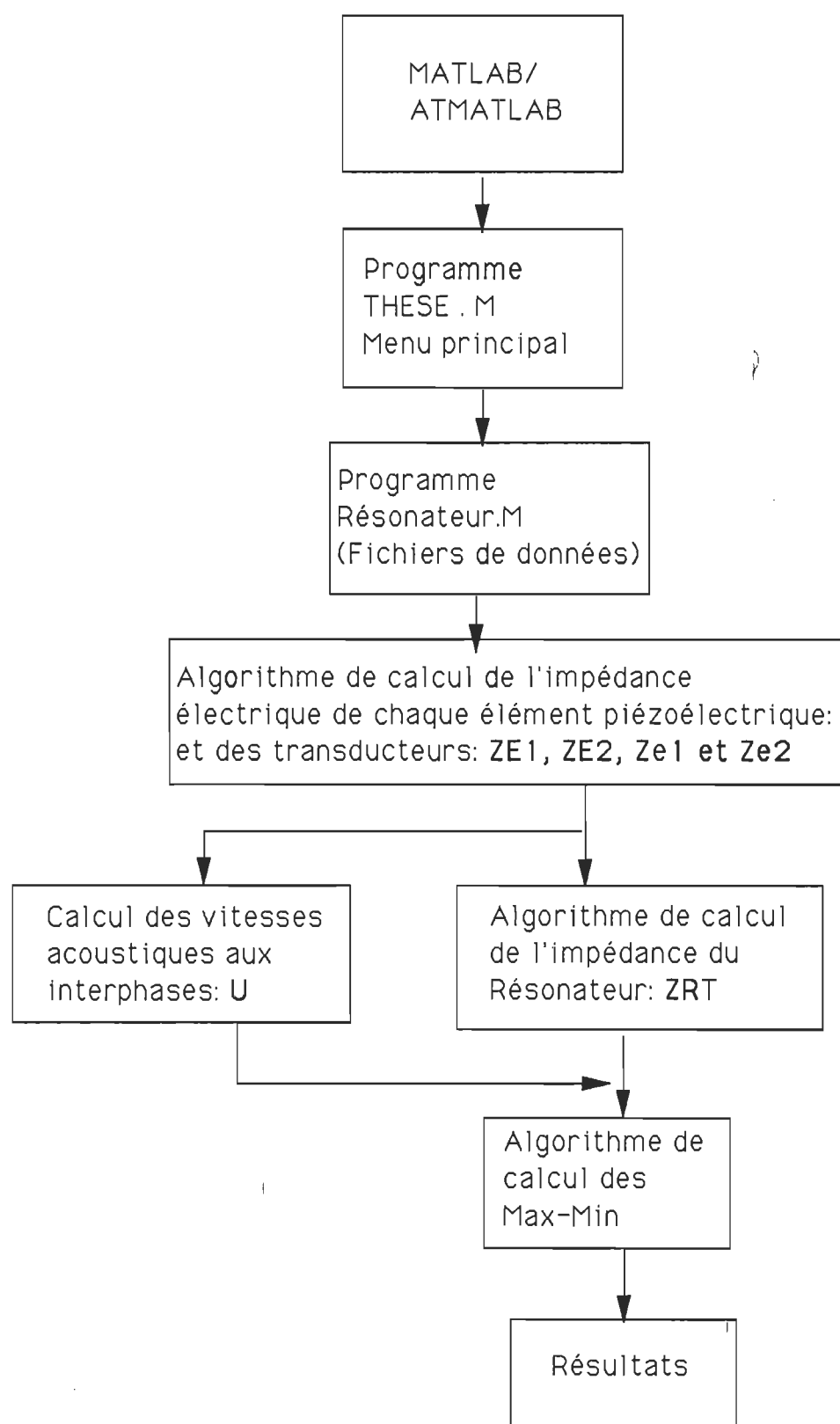


Figure 56 Organigramme de la boucle de deux éléments piézoélectriques

```

%*****
%*PROGRAMME POUR CALCULER LES VARIABLES D'UN TRANSDUCTEUR
%*COMPOSE PAR DEUX ELEMENT PIEZO EN PARALLELE, JUILLET 1992
%*****
fprintf('*****\n')
fprintf('*   CALCUL EN COURS   *\n')
fprintf('*****\n')
clg
hold off
%=====
%*DONNEES DU PROBLEME
%=====
Fi=fi;
Fs=fs;
Ni=ni;
%*****PLA É DE FREQUENCE*****
f=Fi:(Fs-Fi)/Ni:Fs;
%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL
%*****
W=2*pi.*f;
%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL PREMIER CAS TENSION TRANSDUCTEUR 2 (V=0)
%*****
%ve=3600.792254;
c1=ZP2.*ve;
C20=(c1.*v2.*Kr2./(f.*pi)).*((f./fr2).^N2);
Z02=(ZP2.*(1+j.*(C20./(2.*c1))));
K00=W./ve;
K10=Kr2.*((f./fr2).^N2);
gk=(K10+j.*(K00));
for m2=id:-1:1;
    c11=Zo2(m2).*vv2(m2);
    C21=(c11.*v2(m2).*KKr2(m2)./(f.*pi)).*((f./fr2).^Nd(m2));
    c2=c11+j.*C21;
    Koo=W./vv2(m2);
    K12=KKr2(m2).*((f./fr2).^Nd(m2));
    g2=(K12+j.*(Koo));
    Zo21=c2.*g2./(j.*W);
    NUN2=(Z2+Zo21.*tanh(g2.*aa2(m2))).*Zo21;
    DEN2=(Zo21+Z2.*tanh(g2.*aa2(m2)));
    if m2==4,
        Z14=NUN2./DEN2;
        Z2=Z14;
    elseif m2==3,
        Z13=NUN2./DEN2;
        Z2=Z13;
    elseif m2==2,
        Z12=NUN2./DEN2;
        Z2=Z12;
    elseif m2==1,
        Z11=NUN2./DEN2;

```

```

        Z2=Z11;
    end
end
%if id==4
%  Z2=400;
%end
Zn2=(Z2+Z02.*tanh(gk.*ap2)).*Z02;
Zd2=(Z02+Z2.*tanh(gk.*ap2));
Z1=Zn2./Zd2;
Zee2=Zn2./Zd2;
%*** *****
%*  CALCUL DE L'IMPEDANCE A DROITE DU PIEZO 1
%*****
for m=i:-1:1;
    c1=Zo(m).*v(m);
    C2=(c1.*v(m).*Kr(m)./(f.*pi)).*((f./fr).^ Np(m));
    c=c1+j.*C2;
    Ko=W./v(m);
    K1=Kr(m).*((f./fr).^ Np(m));
    g=(K1+j.*(Ko));
    Zoo1=c.*g./(j.*W);
    NUN=(Z1+Zoo1.*tanh(g.*a(m))).*Zoo1;
    DEN=(Zoo1+Z1.*tanh(g.*a(m)));
    if m==20,
        Z20=NUN./DEN;
        Z1=Z20;
    elseif m==19,
        Z19=NUN./DEN;
        Z1=Z19;
    elseif m==18,
        Z18=NUN./DEN;
        Z1=Z18;
    elseif m==17,
        Z17=NUN./DEN;
        Z1=Z17;
    elseif m==16,
        Z16=NUN./DEN;
        Z1=Z16;
    elseif m==15,
        Z15=NUN./DEN;
        Z1=Z15;
    elseif m==14,
        Z14=NUN./DEN;
        Z1=Z14;
    elseif m==13,
        Z13=NUN./DEN;
        Z1=Z13;
    elseif m==12,
        Z12=NUN./DEN;
        Z1=Z12;
    elseif m==11,
        Z11=NUN./DEN;

```

```

        Z1=Z11;
    elseif m==10,
        Z10=NUN./DEN;
        Z1=Z10;
    elseif m==9,
        Z91=NUN./DEN;
        Z1=Z91;
    elseif m==8,
        Z81=NUN./DEN;
        Z1=Z81;
    elseif m==7,
        Z71=NUN./DEN;
        Z1=Z71;
    elseif m==6,
        Z61=NUN./DEN;
        Z1=Z61;
    elseif m==5,
        Z51=NUN./DEN;
        Z1=Z51;
    elseif m==4,
        Z41=NUN./DEN;
        Z1=Z41;
    elseif m==3,
        Z31=NUN./DEN;
        Z1=Z31;
    elseif m==2,
        Z21=NUN./DEN;
        Z1=Z21;
    elseif m==1,
        Z1=NUN./DEN;
    end
end
%*****
%*  CALCUL DE L'IMPEDANCE A GAUCHE DU PIEZO 1
%*****
for K=ia:-1:1;
    c1=Zao(K).*va(K);
    C2=(c1.*va(K)*Kra(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(K));
    c=c1+j.*C2;
    Koa=W./va(K);
    K1a=Kra(K).*((f./fr).^Nap(K));
    ga=(K1a+j.*(Koa));
    Zoo=c.*ga./(j.*W);
    NUNa=(ZA1+Zoo.*tanh(ga.*aa(K))).*Zoo;
    DENa=(Zoo+ZA1.*tanh(ga.*aa(K)));
    if K==4,
        Za4=NUNa./DENa;
        ZA1=Za4;
    elseif K==3,
        Za3=NUNa./DENa;
        ZA1=Za3;
    elseif K==2,

```



```

        Za2=NUNa./DENa;
        ZA1=Za2;
    elseif K==1,
        Za1=NUNa./DENa;
        ZA1=Za1;
    end
end
%if ia==2
%  ZA1=400;
%end
%*****
%* ELEMENT PIEZO 1 COMME EMETTEUR
%*****
    c10=Z1o*vw;
    CH=(c10.*vw.*Krr./(f.*pi)).*((f./fr).^Nn);
    c1=c10+j.*CH;
    K00=W./vw;
    K10=Krr.*((f./fr).^Nn);
    go1=(K10+j.*(K00));
    Z01=c1.*go1./(j.*W);
    F11=Z01.*cosh(go1.*ap)./sinh(go1.*ap);
    F21=Z01./sinh(go1.*ap);
    KX=h./(j.*W.*A);
%*****
%*  CALCUL DE L'IMPEDANCE ELECTRIQUE DU PIEZO 1
%*****
    %N1=(KX.^2).*(Z1+ZA1-2*(F21-F11))*A;
    D1=F21.^2-F11.^2-Z1.*ZA1-F11.*(Z1+ZA1);
    %ZE1=(N1./D1-j./(W.*Co));
    %ZZ1=abs(ZE1);
    G1=((F11-F21+Z1).*KX./D1);
    G2=((F21-F11-ZA1).*KX./D1);
    Vs=1;
    FF=A.*KX.*(G1-G2);
    ZE1=(FF-j./(W.*Co));
    ZZ1=abs(ZE1);
    V0=(G1.*Vs./ZE1);
    V1=(G2.*Vs./ZE1);
    U91=V0;
    U101=V1;
    % V=ZE1;
    % complex
    % ArgZ=Y.*180./pi;
    % V=V0;
    % complex
    % Arg1=Y.*180./pi;
    % V=V1;
    % complex
    % Arg2=Y.*180./pi;
%*****
%*CALCUL DE LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR CHAQUE FACE A DROITE
%*DU PIEZO 1

```

```

%*****
Ze2=Zn2./Zd2;
ZE=400;
for y=1:1:i;
    c1=Zo(y).*v(y);
    CC2=(c1.*v(y).*Kr(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^ Np(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v(y);
    KK1=Kr(y).*((f./fr).^ Np(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    %if y==i,
    %    Z21=ZE;
    %end
    if y==1,
        Vn1=V1.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Z21.*sinh(gg.*a(y));
        V21=(Vn1./Vd1);
        U111=V21;
    elseif y==2,
        if y==i,
            Z31=ZE;
        end
        Vn2=V21.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Z31.*sinh(gg.*a(y));
        V3=(Vn2./Vd2);
        U121=V3;
    elseif y==3,
        %if y==i,
        %    Ze2=ZE;
        %end
        Vn3=V3.*Zop;
        Vd3=Zop.*cosh(gg.*a(y))+Ze2.*sinh(gg.*a(y));
        V4=(Vn3./Vd3);
        U131=V4;
    end
end
Vn4=V4.*Z02;
Vd4=Z02.*cosh(gk.*ap2)+Z2.*sinh(gk.*ap2);
U141=Vn4./Vd4;
V55=U141;
for K=1:1:id
    c1=Zo2(K).*w2(K);
    C2=(c1.*w2(K).*KKr2(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^ Nd(K));
    c=c1+j.*C2;
    Ko=W./w2(K);
    K1=KKr2(K).*((f./fr).^ Nd(K));
    gy=(K1+j.*(Ko));
    ZR2=c.*gy./(j.*W);
    if K==1,
        if K==id,
            Z12=ZD;

```

```

end
Vn5=V55.*ZR2;
Vd5=ZR2.*cosh(gy.*aa2(K))+Z12.*sinh(gy.*aa2(K));
V66=(Vn5./Vd5);
U151=V66;
elseif K==2,
    if K==id,
        Z13=ZD;
    end
    Vn6=V66.*ZR2;
    Vd6=ZR2.*cosh(gy.*aa2(K))+Z13.*sinh(gy.*aa2(K));
    V77=(Vn6./Vd6);
    U161=V77;
elseif K==3,
    if K==id,
        Z14=ZD;
    end
    Vn7=V77.*ZR2;
    Vd7=ZR2.*cosh(gy.*aa2(K))+Z14.*sinh(gy.*aa2(K));
    V88=(Vn7./Vd7);
    U171=V88;
elseif K==4,
    if K==id,
        Z15=ZD;
    end
    Vn8=V88.*ZR2;
    Vd8=ZR2.*cosh(gy.*aa2(K))+Z15.*sinh(gy.*aa2(K));
    V99=(Vn8./Vd8);
    U181=V99;
end
end
end

```

```

%*****
%ALGORITHME POUR CALCULER LES VARIABLES AVEC TENSION DU
%PIÉZO 1 (V=0)
%*****
c10=Z1o.*ve;
CH=(c10.*w.*Krr./((f.*pi)).*((f./fr). ^ Nn);
c1=c10+j.*CH;
K00=W./ve;
K10=Krr.*((f./fr). ^ Nn);
go1=(K10+j.*(K00));
Z011=c1.*go1./(j.*W);
Zn1=(ZA1+Z011.*tanh(go1.*ap)).*Z011;
Zd1=(Z011+ZA1.*tanh(go1.*ap));
ZA11=Zn1./Zd1;
Zee1=Zn1./Zd1;
%*****
%**CALCUL DE L'IMPEDANCE A GAUCHE DU PIÉZO 2 (V1=0)
%*****
for K=1:1:i;
    c11=Zo(K).*v(K);
    C22=(c11.*v(K)*Kr(K)./(f.*pi)).*((f./fr2). ^ Np(K));
    CD=(c11+j.*C22);
    Koa=W./v(K);
    K1a=Kr(K).*((f./fr2). ^ Np(K));
    ga=(K1a+j.*(Koa));
    X=CD.*ga;
    P=j.*W;
    Zoo=X./P;
    NUNa=(ZA11+Zoo.*tanh(ga.*a(K))).*Zoo;
    DENa=(Zoo+ZA11.*tanh(ga.*a(K)));
    if K==1,
        Za20=NUNa./DENa;
        ZA11=Za20;
    elseif K==2,
        Za19=NUNa./DENa;
        ZA11=Za19;
    elseif K==3,
        Za18=NUNa./DENa;
        ZA11=Za18;
    elseif K==4,
        Za17=NUNa./DENa;
        ZA11=Za17;
    elseif K==5,
        Za16=NUNa./DENa;
        ZA11=Za16;
    elseif K==6,
        Za15=NUNa./DENa;
        ZA11=Za15;
    elseif K==7,
        Za14=NUNa./DENa;
        ZA11=Za14;
    elseif K==8,

```

```

    Za13=NUNa./DENa;
    ZA11=Za13;
elseif K==9,
    Za12=NUNa./DENa;
    ZA11=Za12;
elseif K==10,
    Za11=NUNa./DENa;
    ZA11=Za11;
elseif K==11,
    Za10=NUNa./DENa;
    ZA11=Za10;
elseif K==12,
    Za9=NUNa./DENa;
    ZA11=Za9;
elseif K==13,
    Za8=NUNa./DENa;
    ZA11=Za8;
elseif K==14,
    Za7=NUNa./DENa;
    ZA11=Za7;
elseif K==15,
    Za6=NUNa./DENa;
    ZA11=Za6;
elseif K==16,
    Za5=NUNa./DENa;
    ZA11=Za5;
elseif K==17,
    Za4=NUNa./DENa;
    ZA11=Za4;
elseif K==18,
    Za3=NUNa./DENa;
    ZA11=Za3;
elseif K==19,
    Za2=NUNa./DENa;
    ZA11=Za2;
elseif K==20,
    Za1=NUNa./DENa;
    ZA11=Za1;
end
end
c1o=ZP2*v2;
C20=(c1o.*v2.*Kr2./(f.*p)).*((f./fr2).^N2);
%Z02=(Z1o.*(1+j*(C20./(2.*c1o))));
c=c1o+j.*C20;
K00=W./v2;
K10=Kr2.*((f./fr2).^N2);
go=(K10+j.*(K00));
Z02=c.*go./(j*W);
F1=Z02.*cosh(go.*ap2)./sinh(go.*ap2);
F2=Z02./sinh(go.*ap2);
K2=h2./(j.*W.*A2);
%*****

```

```

%Calcul de l'impédance
%*****
%Numerator de l'impédance premiere partie
%*****
N=(K2.^2).*(Z2+ZA11-2*(F2-F1))*A2;
%*****
%Denominateur de l'impedance premiere partie
%*****
D=F2.^2-F1.^2-Z2.*ZA11-F1.*(Z2+ZA11);
%*****
ZE2=(N./D-j./(W.*Co2));
ZZ2=abs(ZE2);
%*****
%*Expressions de la vitesse acoustique
%*****
G11=((F1-F2+Z2).*K2./D);
G21=((F2-F1-ZA11).*K2./D);
%Zi=R+j*X;
%Ve=V.*Ze./(Ze+Zi);
Ve=1;
V02=(G11.*Ve./ZE2);
Vz=(G21.*Ve./ZE2);
U132=V02;
U142=Vz;
%V=ZE2;
%complex
%Arg3=Y.*180./pi;
%V=V02;
%complex
%Arg4=Y.*180./pi;
%V=Vz;
%complex
%Arg5=Y.*180./pi;
%*****
%*CALCUL DE LA VITESSE ACOUSTIQUE SUR CHAQUE FACE DROITE
%*****
for H=1:1:id;
    cc1=Zo2(H).*w2(H);
    CC2=(cc1.*w2(H).*KKr2(H)./(f.*pi)).*((f./fr2).^Nd(H));
    ck=cc1+j.*CC2;
    KKo=W./w2(H);
    KK1=KKr2(H).*((f./fr2).^Nd(H));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zoo=ck.*gg./(j*W);
    if H==1,
        if H==id,
            Z12=ZD;
        end
        Un1=Vz.*Zoo;
        Ud1=Zoo.*cosh(gg.*aa2(H))+Z12.*sinh(gg.*aa2(H));
        U2=Un1./Ud1;
        U152=U2;
    end
end

```

```

elseif H==2,
    if H==id,
        Z13=ZD;
    end
    U4=U2.*Zoo;
    U5=Zoo.*cosh(gg.*aa2(H))+Z13.*sinh(gg.*aa2(H));
    U162=(U4./U5);
elseif H==3,
    if H==id,
        Z14=ZD;
    end
    Un2=U162.*Zoo;
    Ud2=Zoo.*cosh(gg.*aa2(H))+Z14.*sinh(gg.*aa2(H));
    U172=(Un2./Ud2);
elseif H==id,
    if H==id,
        Z15=ZD;
    end
    Un3=U172.*Zoo;
    Ud3=Zoo.*cosh(gg.*aa2(H))+Z15.*sinh(gg.*aa2(H));
    U182=(Un3./Ud3);
end
end
end
lx=j.*W.*Co.*(Vs-(V0-V1).*h./(j.*W));
Zx=Vs./lx;
ly=j.*W.*Co.*(Vs-(V02-Vz).*h./(j.*W));
Zy=Vs./ly;
ZZ1=abs(Zx);
ZZ2=abs(Zy);
projet2
projet1
%*****
%** THEOREME DE SUPERPOSITION
%*****
U5=abs(Va5+U52);
U6=abs(Va6+U62);
U7=abs(Va7+U72);
U8=abs(Va8+U82);
U9=abs(U91+U92);
U10=abs(U101+U102);
U11=abs(U111+U112);
U12=abs(U121+U122);
U13=abs(U131+U132);
U14=abs(U141+U142);
U15=abs(U151+U152);
U16=abs(U161+U162);
U17=abs(U171+U172);
U18=abs(U181+U182);
U1A=U91+U92;
U1B=U101+U102;
U2A=U131+U132;

```

```

U2B=U141+U142;
Vs=1;
%*****
%* CALCUL DES IMPÉDANCES DES TRANSDUCTEURS
%*****
I1=j.*W.*Co.*(Vs-h.*(U1A-U1B))./(j.*W));
I2=j.*W.*Co2.*(Vs-h2.*(U2A-U2B))./(j.*W));
Ze1=Vs./I1;
Ze2=Vs./I2;
Z=Vs./(I1+I2);
X=length(f);
A=0;
for l=1:1:X
    A=A+1;
    if real(Z(A))<0
        Z1(A)=conj(Z(A));
        Z1(A)=-Z1(A);
    else
        Z1(A)=Z(A);
    end
end
%*****
%* IMPÉDANCE DU RÉSONATEUR
%*****
ZZe1=abs(Ze1);
ZZe2=abs(Ze2);
ZRT=abs(Z1);
XA=180.*(angle(Z1))./pi;
npt=length(f);
D=ZZ1(2)-ZZ1(1);
if D>0
    Mn=[ZZ1(1);f(1)];
    Mx=[];
else
    Mx=[ZZ1(1);f(1)];
    Mn=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D=ZZ1(l+1)-ZZ1(l);
    Max=[];
    while D>0 & l+1<npt
        Max=[ZZ1(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D=ZZ1(l+1)-ZZ1(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx=[Mx[ZZ1(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx=[Mx Max];
        Min=[];
        while D<0 & l+1<npt

```



```

        Min=[ZZ1(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D=ZZ1(l+1)-ZZ1(l);
    end
    if l+1==npt
        Mn=[Mn[ZZ1(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mn=[Mn Min];
    end
end
end
D=ZZ2(2)-ZZ2(1);
if D>0
    Mn1=[ZZ2(1);f(1)];
    Mx1=[];
else
    Mx1=[ZZ2(1);f(1)];
    Mn1=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D=ZZ2(l+1)-ZZ2(l);
    Max1=[];
    while D>0 & l+1<npt
        Max1=[ZZ2(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D=ZZ2(l+1)-ZZ2(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx1=[Mx1[ZZ2(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx1=[Mx1 Max1];
        Min1=[];
        while D<0 & l+1<npt
            Min1=[ZZ2(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D=ZZ2(l+1)-ZZ2(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn1=[Mn1[ZZ2(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn1=[Mn1 Min1];
        end
    end
end
end
D=ZRT(2)-ZRT(1);
if D>0
    Mn2=[ZRT(1);f(1)];
    Mx2=[];
else
    Mx2=[ZRT(1);f(1)];
    Mn2=[];
end

```

```

end
l=2;
while l+1<npt
    D=ZRT(l+1)-ZRT(l);
    Max2=[];
    while D>0 & l+1<npt
        Max2=[ZRT(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D=ZRT(l+1)-ZRT(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx2=[Mx2[ZRT(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx2=[Mx2 Max2];
        Mi2=[];
        while D<0 & l+1<npt
            Min2=[ZRT(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D=ZRT(l+1)-ZRT(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn2=[Mn2[ZRT(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn2=[Mn2 Min2];
        end
    end
end
end
[m,n]=size(Mx);
[q,q]=size(Mn);
[r,s]=size(Mx1);
[t,d]=size(Mn1);
[n3,n1]=size(Mx2);
[q4,q1]=size(Mn2);
%load b:92092306
for T=1:1:100
    clg
    hold off
    fprintf(' *****\n')
    fprintf(' * UNIVERSITE DU QUEBEC A TROIS RIVIERES *\n')
    fprintf(' * LABORATOIRE D'ULTRASONIQUE ET CAPTEURS *\n')
    fprintf(' * RESONATEUR ULTRASONORE: 2 PIEZOS *\n')
    fprintf(' *****\n')
    fprintf('* RESULTATS GRAPHIQUES IMPEDANCE ET VITESSE *\n')
    fprintf(' *****\n')
    fprintf('* 1.-IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 1 *\n')
    fprintf('* 2.-IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 2 *\n')
    fprintf('* 3.-IMPEDANCE ELECTRIQUE RESONATEUR *\n')
    fprintf('* 4.-ARG. IMPEDANCE ELECT.RESONATEUR *\n')
    fprintf('* 5.-SUPERPOSITION GRAPHIQUES IMPEDANCES *\n')
    fprintf('* 6.-VITESSES ACOUSTIQUES AUX DIVERSES INT. *\n')
    fprintf('* 7.-PLUSIEURS GRAPHIQUES SUR L ECRAN *\n')
    fprintf('* 8.-VALEURS MAX-MIN DES IMPEDANCES *\n')

```

```

fprintf('*****\n')
WW=input('CHOISIR 1.....8 ET ' 0 ' POUR SORTIR=')
if WW==0
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
    break
elseif WW==8
    for K=1:1:n
        fprintf('*****\n')
        fprintf('*    MAX.IMP.ELECT.PIEZO 1    *\n')
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MaxZ1=%e\n',Mx(1,K))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx(2,K))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for R=1:1:q
        fprintf('*****\n')
        fprintf('*    MIN.IMP.ELECT.PIEZO 1    *\n')
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MinZ1=%e\n',Mn(1,R))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn(2,R))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for T=1:1:s |
        fprintf('*****\n')
        fprintf('*    MAX.IMP.ELECT.PIEZO 2    *\n')
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MaxZ2=%e\n',Mx1(1,T))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx1(2,T))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for Q=1:1:d
        fprintf('*****\n')
        fprintf('*    MIN.IMP.ELECT.PIEZO 2    *\n')
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MinZ2=%e\n',Mn1(1,Q))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn1(2,Q))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for W=1:1:n1
        fprintf('*****\n')
        fprintf('*    MAX. IMP.ELECT.TRANS.    *\n')
        fprintf('*****\n')
        fprintf('VALEUR MaxZt=%e\n',Mx2(1,W))
        fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mx2(2,W))
        fprintf('*****\n')
    end
    pause
    for F=1:1:q1

```

```

fprintf('*****\n')
fprintf('*    MIN.IMP.ELECT.TRANSD.    *\n')
fprintf('*****\n')
fprintf('VALEUR MinZt=%e\n',Mn2(1,F))
fprintf('VALEUR Freq=%e\n',Mn2(2,F))
fprintf('*****\n')
end
pause
elseif WW==1
%load b:92092304
%axis([30,110,1,3])
semilogy(f,ZZ1,'g')
title('IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 1')
xlabel('FREQUENCE EN KHz')
ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
pause
elseif WW==2
%load b:92092308
%axis([30,110,1,3])
semilogy(f,ZZ2,'g')
title('IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 2')
xlabel('FREQUENCE EN KHz')
ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
pause
elseif WW==3
load b:92101816
axis([120,180,3,6])
semilogy(z(:,1),z(:,2),f.*1e-3,ZRT,'g')
% semilogy(f,ZRT)
title('IMPEDANCE ELECTRIQUE TRANSDUCTEUR T14 (AIR-EAU)')
xlabel('FREQUENCE EN Hz')
ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
pause
elseif WW==4
%axis([30e3,60e3,-100,100])
plot(f,XA,'g')
title(' ARG.IMPEDANCE TRANSDUCTEUR')
xlabel('FREQUENCE EN Hz')
ylabel('ARG. EN DEGRES')
pause
elseif WW==5
%axis([30e3,60e3,3,7])
semilogy(f,ZRT,f,ZZ1,f,ZZ2)
title('IMPEDANCE ELECTRIQUE DU PIEZO 1 , 2 ET DU TRANSDUCTEUR')
xlabel('FREQUENCE EN Hz')
ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
pause
elseif WW==6
b=input('QUELLE VITESSE ACOUSTIQUE=')
clg
hold off
if b==10

```

```

U=U10;
semilogy(f,U10,'g')
title('VITESSE ACOUSTIQUE U10 A DROITE DU PIEZO 1')
xlabel('FREQUENCE EN Hz')
ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
pause
elseif b==11
    U=U11;
    semilogy(f,U11,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U11 A DROITE DU PIEZO 1')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==12
    U=U12;
    semilogy(f,U12,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U12 A DROITE DU PIEZO 1')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==13
    U=U13;
    semilogy(f,U13,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U13 A DROITE DU PIEZO 1')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==14
    U=U14;
    semilogy(f,U14,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U14 A DROITE DU PIEZO 2')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==15
    U=U15;
    semilogy(f,U15,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U15 A DROITE DU PIEZO 2')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==16
    U=U16;
    semilogy(f,U16,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U16 A DROITE DU PIEZO 2')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==17
    U=U17;
    semilogy(f,U17,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U17 A DROITE DU PIEZO 2')

```

```

xlabel('FREQUENCE EN Hz')
ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
pause
elseif b==18
    U=U18;
    semilogy(f,U18,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U18 A DROITE DU PIEZO 2')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==5
    U=U5;
    semilogy(f,U5,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U5')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==6
    U=U6;
    semilogy(f,U6,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U6')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==7
    U=U7;
    semilogy(f,U7,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U7')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==8
    U=U8;
    semilogy(f,U8,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U8')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
elseif b==9
    U=U9;
    semilogy(f,U9,'g')
    title('VITESSE ACOUSTIQUE U9')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('VITESSE ACOUSTIQUE EN m/s')
    pause
end
NN=input('VOUS VOULEZ LES MAX-MIN DE LA VITESSE(1/0)=')
if NN==1
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*      CALCUL EN COURS      *\n')
    fprintf('*****\n')
    npt=length(f);

```

```

D3=U(2)-U(1);
if D>0
    Mn3=[U(1);f(1)];
    Mx3=[];
else
    Mx3=[U(1);f(1)];
    Mn3=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D3=U(l+1)-U(l);
    Max3=[];
    while D3>0 & l+1<npt
        Max3=[U(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D3=U(l+1)-U(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx3=[Mx3 U(l+1);f(l+1)];
    else
        Mx3=[Mx3 Max3];
        Min3=[];
        while D3<0 & l+1<npt
            Min3=[U(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D3=U(l+1)-U(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn3=[Mn3 U(l+1);f(l+1)];
        else
            Mn3=[Mn3 Min3];
        end
    end
end
[K,L]=size(Mx3);
[M,N]=size(Mn3);
for R=1:1:L
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*   VALEURS MAX. DE LA VITESSE   *\n')
    fprintf('* *****\n')
    fprintf('Valeur MaxZ=%e\n',Mx3(1,R))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mx3(2,R))
    pause
end
for R=1:1:N
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*   VALEURS MIN. DE LA VITESSE   *\n')
    fprintf('* *****\n')
    fprintf('Valeur MinZ=%e\n',Mn3(1,R))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mn3(2,R))
    pause
end

```

```

elseif NN==0
    KK=input('UNE AUTRE VITESSE(1/0)=')
    if KK==0
        break
        fprintf('FIN DE CALCUL\n')
    end
end
elseif WW==7
    axis([30e3,180e3,1,3])
    subplot(221),semilogy(f,ZZ1,'g')
    title('Imp. piezo 1 de T14(A-E)')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Imp. en Ohms')
    subplot(222),semilogy(f,ZZ2)
    title('Imp. piezo 2 de T14(A-E)')
    xlabel('freq. en Hz')
    ylabel('Imp. en Ohms')
    subplot(223),semilogy(f,ZRT,'b')
    title('Imp. transducteur T14(A-E)')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Imp. en Ohms')
    axis([30e3,180e3,-100,100])
    subplot(224),plot(f,XA,'w')
    title('Arg. Transducteur T14(A-E)')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Arg. en degres')
    pause
    clg
    hold off
    axis([30e3,180e3,-7,-2])
    subplot(221),semilogy(f,U5,'g')
    title('Vitesse U5')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    subplot(222),semilogy(f,U6,'g')
    title('Vitesse U6')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    subplot(223),semilogy(f,U7)
    title('Vitesse U7')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    subplot(224),semilogy(f,U8,'b')
    title('Vitesse U8')
    xlabel('Freq. en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    pause
    clg
    hold off
    axis([30e3,180e3,-7,-2])
    subplot(221),semilogy(f,U9,'g')
    title('Vitesse U9')

```



```

xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(222),semilogy(f,U10,'g')
title('Vitesse U10')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(223),semilogy(f,U11,'g')
title('Vitesse U11')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(224),semilogy(f,U12,'g')
title('Vitesse U12')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
pause
clg
hold off
axis([30e3,180e3,-7,-2])
subplot(221),semilogy(f,U13,'g')
title('Vitesse U13')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(222),semilogy(f,U14,'g')
title('Vitesse U14')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(223),semilogy(f,U15,'g')
title('Vitesse U15')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(224),semilogy(f,U16,'g')
title('Vitesse U16')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
pause
clg
hold off
subplot(121),semilogy(f,U17,'g')
title('Vitesse U17')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
subplot(122),semilogy(f,U18,'g')
title('Vitesse U18')
xlabel('Freq. en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
pause
end
end
end
end
end
end
end

```

```
end  
fprintf("VOUS POUVEZ VERIFIER TOUTES LES VARIABLES MAINTENANT\n")
```

```

%*****
%ALGORITHME DE CALCUL POUR LES VITESSES A GAUCHE DU PIEZO 2
%*****
Zb=400;
Ze12=Zn1./Zd1;
for K=i:-1:1;
    c1=Zo(K).*v(K);
    CC2=(c1.*v(K).*Kr(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^ Np(K));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v(K);
    KK1=Kr(K).*((f./fr).^ Np(K));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zoo=c.*gg./(j.*W);
    %if K==1,
    %  Za19=Zn;
    %end
    if K==3,
        Vn=V02.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Za19.*sinh(gg.*a(K));
        V8=(Vn./Vd);
        U122=V8;
    elseif K==2,
        %if K==1,
        %  Za20=Zn;
        %end
        Vn=V8.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Za20.*sinh(gg.*a(K));
        V7=(Vn./Vd);
        U112=V7;
    elseif K==1
        Vn=V7.*Zoo;
        Vd=Zoo.*cosh(gg.*a(K))+Ze12.*sinh(gg.*a(K));
        V6=(Vn./Vd);
        U102=V6;
    end
end
Vn=V6.*Z011;
Vd=Z011.*cosh(g01.*ap)+ZA1.*sinh(g01.*ap);
V5=(Vn./Vd);
U92=V5;
for K=1:1:ia;
    c1=Zao(K).*va(K);
    C2=(c1.*va(K).*Kra(K)./(f.*pi)).*((f./fr2).^ Nap(K));
    c=c1+j.*C2;
    Ko=W./va(K);
    K1=Kra(K).*((f./fr2).^ Nap(K));
    g=(K1+j.*Ko);
    Zoo=c.*g./(j.*W);
    %if K==ia,
    %  Za2=Zn;
    %end
    if K==1

```

```

Vn=V5.*Zoo;
Vd=Zoo.*cosh(g.*aa(K))+Za2.*sinh(g.*aa(K));
V44=(Vn./Vd);
U82=V44;
elseif K==2,
    if K==ia,
        Za3=Zb;
    end
    Vn=V44.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(g.*aa(K))+Za3.*sinh(g.*aa(K));
    V3=(Vn./Vd);
    U72=V3;
elseif K==3,
    if K==ia,
        Za4=Zb;
    end
    Vn=V3.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(g.*aa(K))+Za4.*sinh(g.*aa(K));
    V2=(Vn./Vd);
    U62=V2;
elseif K==4,
    if K==ia,
        Za5=Zb;
    end
    Vn=V2.*Zoo;
    Vd=Zoo.*cosh(g.*aa(K))+Za5.*sinh(g.*aa(K));
    V11=(Vn./Vd);
    U52=V11;
end
end
end
end

```

Organigramme de la boucle de trois éléments piézoélectriques

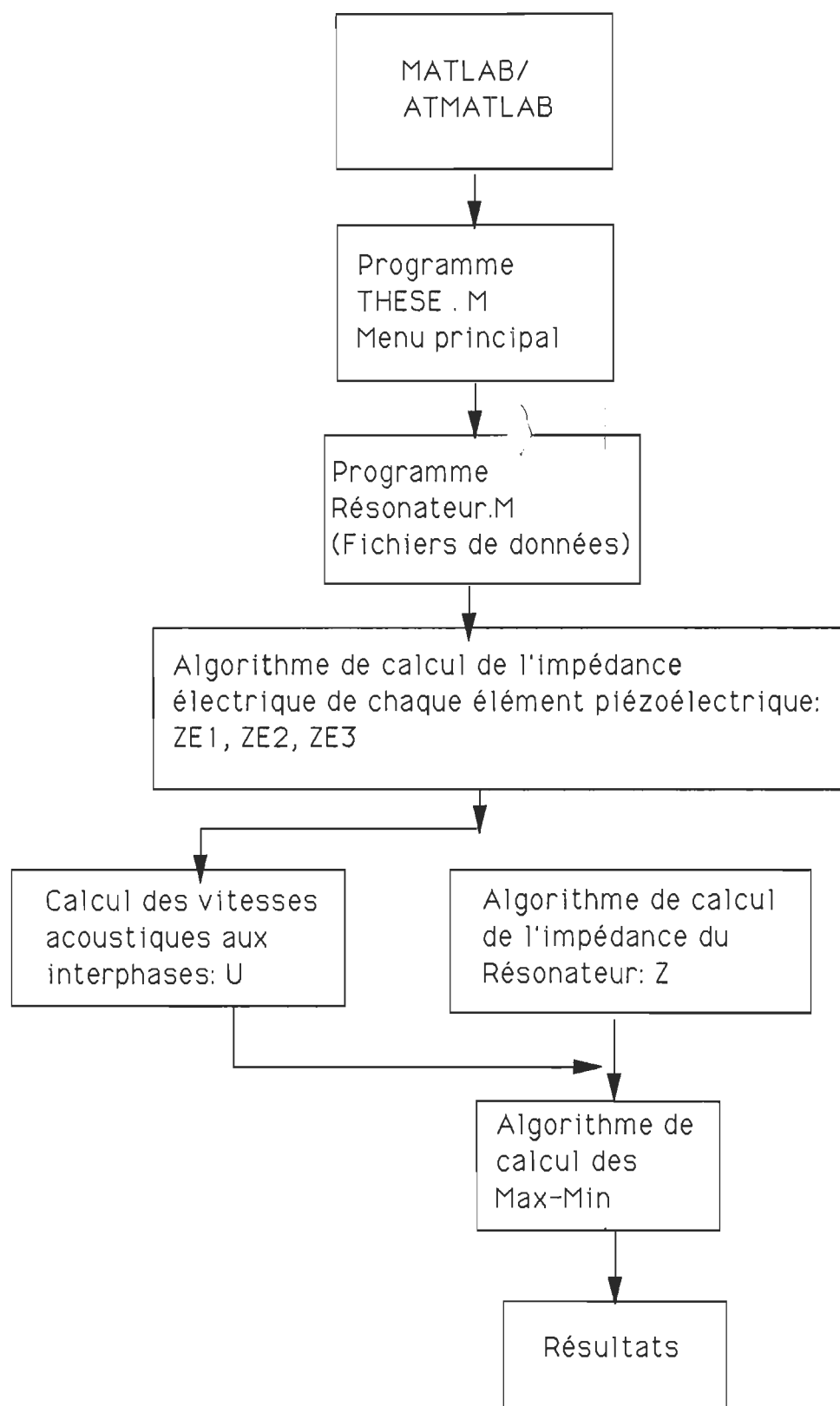


Figure 57 Organigramme de la boucle de trois éléments piézoélectriques.

```

%*****
%*PROGRAMME POUR CALCULER LES VARIABLES D'UN RÉSONATEUR COMPOSE
%*PAR TROIS ELEMENTS PIEZOELECTRIQUE - AOUT 1992
%*****
fprintf('*****\n')
fprintf('*   CALCUL EN COURS   *\n')
fprintf('*****\n')
%=====
%*                               DONNEES DU PROBLEME
%=====
%
%*****
Fi=fi;
Fs=fs;
Ni=ni;
%*****PLAGE DE FREQUENCE*****
f=Fi:(Fs-Fi)/Ni:Fs;
%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL
%*****
W=2*pi.*f;
%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL : PREMIER CAS PIEZO 1 ACTIF
%*****
%*  DONNEES ELEMENT PIEZO 1 EN CC
%*****
c10=ZP1.*ve1;
CH=(c10.*ve1.*Krr./(f.*pi)).*((f./fr).^Nn);
c1=c10+j.*CH;
K10=Krr.*((f./fr).^Nn);
K00=W./ve1;
gp1=(K10+j.*(K00));
Z01=c1.*gp1./(j.*W);
%*****
%*  DONNEES ELEMENT PIEZO 2  EN CC
%*****
v2=ve2;
c1=ZP2.*v2;
C20=(c1.*v2.*Kr12./(f.*pi)).*((f./fr2).^N2);
ca1=c1+j.*C20;
K00=W./v2;
K10=Kr12.*((f./fr2).^N2);
gk1=(K10+j.*(K00));
Z02=ca1.*gk1./(j.*W);
%*****
%*  DONNEES ELEMENT PIEZO 3 EN CC
%*****
v3=ve3;
c2=ZP3.*v3;
C30=(c2.*v3.*Kr13./(f.*pi)).*((f./fr3).^N3);
ca2=c2+j.*C30;
K01=W./v3;

```

```

K20=Kr13.*((f./fr3). ^ N3);
gk2=(K20+j.*(K01));
Z03=ca2.*gk2./(j.*W);
%*****
%* CALCUL DE L'IMPEDANCE A DROITE PIEZO 1
%*****
if CAD==0
    Z2=400;
    Zf=400;
    Z4=400;
end
%*****
%* CALCUL DE L IMPEDANCE D ENTREE A L ELEMENT PIEZO 3
%*****
%for K=i:-1:1;
%    c12=Z12(K).*v12(K);
%    C22=(c12.*v12(K).*Kr2(K)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd2(K));
%    c21=c12+j.*C22;
%    KK=W./v12(K);
%    K22=Kr2(K).*((f./fr). ^ Nd2(K));
%    g3=(K22+j.*(KK));
%    Zo3=c21.*g3./(j.*W);
%    NUN3=(Z4+Zo3.*tanh(g3.*aa3(K))).*Zo3;
%    DEN3=(Zo3+Z4.*tanh(g3.*aa3(K)));
%    if K==4
%        Z24=NUN3./DEN3;
%        Z4=Z24;
%    elseif K==3
%        Z25=NUN3./DEN3;
%        Z4=Z25;
%    elseif K==2
%        Z26=NUN3./DEN3;
%        Z4=Z26;
%    elseif K==1
%        Z27=NUN3./DEN3;
%        Z4=Z27;
%    end
%end
if CAD1==0
    Z27=400;
    Z4=400;
end
Zn3=(Z4+Z03.*tanh(gk2.*ap3)).*Z03;
Zd3=(Z03+Z4.*tanh(gk2.*ap3));
Z3=Zn3./Zd3;
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE D ENTREE A L ELEMENT PIEZO 2
%*****
for K2=i2:-1:1
    c13=Z13(K2).*v13(K2);
    C23=(c13.*v13(K2).*Kr3(K2)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd3(K2));
    c31=c13+j.*C23;

```

```

KK1=W./v13(K2);
K23=Kr3(K2).*((f./fr).^Nd3(K2));
g4=(K23+j.*(KK1));
Zo4=c31.*g4./(j.*W);
NUN4=(Z3+Zo4.*tanh(g4.*aa4(K2))).*Zo4;
DEN4=(Zo4+Z3.*tanh(g4.*aa4(K2)));
if K2==5
    Z34=NUN4./DEN4;
    Z3=Z34;
elseif K2==4
    Z44=NUN4./DEN4;
    Z3=Z44;
elseif K2==3
    Z54=NUN4./DEN4;
    Z3=Z54;
elseif K2==2
    Z64=NUN4./DEN4;
    Z3=Z64;
elseif K2==1
    Z3=NUN4./DEN4;
end
end
Zn2=(Z3+Z02.*tanh(gk1.*ap2)).*Z02;
Zd2=(Z02+Z3.*tanh(gk1.*ap2));
Ze2=Zn2./Zd2;
%*****
%* CALCUL DE L'IMPEDANCE A DROITE DU PIEZO 1
%*****
for K3=i3:-1:1
    c14=Z14(K3).*v14(K3);
    C33=(c14.*v13(K3).*Kr4(K3)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(K3));
    c41=c14+j.*C33;
    KK2=W./v14(K3);
    K33=Kr4(K3).*((f./fr).^Nd4(K3));
    g5=(K33+j.*(KK2));
    Zo5=c41.*g5./(j.*W);
    NUN5=(Ze2+Zo5.*tanh(g5.*aa5(K3))).*Zo5;
    DEN5=(Zo5+Ze2.*tanh(g5.*aa5(K3)));
    if K3==4
        Z71=NUN5./DEN5;
        Ze2=Z71;
    elseif K3==3
        Z72=NUN5./DEN5;
        Ze2=Z72;
    elseif K3==2
        Z73=NUN5./DEN5;
        Ze2=Z73;
    elseif K3==1
        Z74=NUN5./DEN5;
        Ze2=Z74;
    end
end
end

```



```

%*****
%*  CALCUL DE L IMPEDANCE A GAUCHE DU PIEZO 1
%*****
%for ik=ia:-1:1;
%  c1=Zao(ik).*va(ik);
%  C2=(c1.*va(ik)*Kra(ik)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nap(ik));
%  c=c1+j.*C2;
%  Koa=W./va(ik);
%  K1a=Kra(ik).*((f./fr). ^ Nap(ik));
%  ga=(K1a+j.*(Koa));
%  Zoo=c.*ga./(j.*W);
%  NUNa=(ZA1+Zoo.*tanh(ga.*aa(ik))).*Zoo;
%  DENa=(Zoo+ZA1.*tanh(ga.*aa(ik)));
%  if ik==4,
%    Za4=NUNa./DENa;
%    ZA1=Za4;
%  elseif ik==3,
%    Za3=NUNa./DENa;
%    ZA1=Za3;
%  elseif ik==2,
%    Za2=NUNa./DENa;
%    ZA1=Za2;
%  elseif ik==1,
%    Za1=NUNa./DENa;
%    ZA1=Za1;
%  end
%end
if CAD==0
  ZA1=400;
  Za1=400;
end
%*****
%*  CALCUL DE L'IMPEDANCE ELECTRIQUE DU PIEZO 1
%*****
c10=ZP1.*vt;
CH=(c10.*vt.*Krr./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nn);
ct1=c10+j.*CH;
K00=W./vt;
K10=Krr.*((f./fr). ^ Nn);
go1=(K10+j.*(K00));
ZO1=ct1.*go1./(j.*W);
F11=ZO1.*cosh(go1.*ap)./sinh(go1.*ap);
F21=ZO1./sinh(go1.*ap);
KX=h./(j.*W.*A);
N1=(KX. ^ 2).*(Z74+Za1-2*(F21-F11))*A;
D1=F21. ^ 2-F11. ^ 2-Z74.*Za1-F11.*(Z74+Za1);
ZE1=(N1./D1-j./(W.*Co));
ZZ1=abs(ZE1);
G1=((F11-F21+Z74).*KX./D1);
G2=((F21-F11-Za1).*KX./D1);

```

```

%*****
%*   VITESSE U91,U101
%*****
U91=(G1.*Vs./ZE1);
U101=(G2.*Vs./ZE1);
%*****
%*   DEUXIEME CAS: PIEZO 2 ACTIF
%*****
%*   CALCUL IMPEDANCE D'ENTREE PIEZO 1 A GAUCHE
%*****
Zn1=(ZA1+Z01.*tanh(gp1.*ap)).*Z01;
Zd1=(Z01+ZA1.*tanh(gp1.*ap));
ZA11=Zn1./Zd1;
Zee1=Zn1./Zd1;
%*****
%**CALCUL DE L IMPEDANCE A GAUCHE DU PIEZO 2
%*****
for T=1:i3;
    ca1=Z14(T).*v14(T);
    Ca1=(ca1.*v14(T).*Kr4(T)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(T));
    CD=(ca1+j.*Ca1);
    Ka1=W./v14(T);
    K1a=Kr4(T).*((f./fr2).^Nd4(T));
    ga1=(K1a+j.*(Ka1));
    X=CD.*ga1;
    P=j.*W;
    Zoa=X./P;
    NUNa1=(ZA11+Zoa.*tanh(ga1.*aa5(T))).*Zoa;
    DENa1=(Zoa+ZA11.*tanh(ga1.*aa5(T)));
    if T==1,
        Za20=NUNa1./DENa1;
        ZA11=Za20;
    elseif T==2,
        Za19=NUNa1./DENa1;
        ZA11=Za19;
    elseif T==3,
        Za18=NUNa1./DENa1;
        ZA11=Za18;
    end
end
end
%*****
%*   CALCUL IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 2
%*****
c11=ZP2.*vr;
CH1=(c11.*vr.*Kr12./(f.*pi)).*((f./fr2).^N2);
c2=c11+j.*CH1;
K01=W./vr;
K11=Kr12.*((f./fr2).^N2);
go2=(K11+j.*(K01));
ZO2=c2.*go2./(j.*W);
F12=ZO2.*cosh(go2.*ap2)./sinh(go2.*ap2);
F22=ZO2./sinh(go2.*ap2);

```

```

Kx2=h2./(j.*W.*A2);
N2=(Kx2.^2).*(ZA11+Z3-2.*(F22-F12)).*A2;
D2=F22.^2-F12.^2-ZA11.*Z3-F12.*(Z3+ZA11);
ZE2=(N2./D2-j./(W.*Co2));
ZZ2=abs(ZE2);
G12=((F12-F22+Z3).*Kx2./D2);
G22=((F22-F12-ZA11).*Kx2./D2);
%*****
%*      VITESSE U132,U142
%*****
U132=(G12.*Vs./ZE2);
U142=(G22.*Vs./ZE2);
%*****
%* TROISIEME CAS : PIEZO 3 ACTIF
%*****
%*  CALCUL IMPEDANCE D ENTREE PIEZO 2 A GAUCHE
%*****
Znn1=(ZA11+Z02.*tanh(gk1.*ap2)).*Z02;
Zdd1=(Z02+ZA11.*tanh(gk1.*ap2));
ZA2=Znn1./Zdd1;
Zea2=ZA2;
%*****
%*  CALCUL IMPEDANCE A GAUCHE PIEZO 3
%*****
for T1=1:1:i2
    ca2=Z13(T1).*v13(T1);
    Ca2=(ca2.*v13(T1).*Kr3(T1)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd3(T1));
    CA=ca2+j.*Ca2;
    Ka2=W./v13(T1);
    K2a=Kr3(T1).*((f./fr2).^Nd3(T1));
    ga2=(K2a+j.*Ka2);
    Zoa1=CA.*ga2./(j.*W);
    %X1=CA.*ga2;
    %P1=j.*W;
    %Zoa1=X1./P1;
    NUNa2=(ZA2+Zoa1.*tanh(ga2.*aa4(T1))).*Zoa1;
    DENa2=(Zoa1+ZA2.*tanh(ga2.*aa4(T1)));
    if T1==1
        Za21=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za21;
    elseif T1==2
        Za22=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za22;
    elseif T1==3
        Za23=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za23;
    elseif T1==4
        Za24=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za24;
    elseif T1==5
        Za25=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za25;

```

```

end
end
%*****
%* IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 1
%*****
%Z74=Za25;
%Z73=Za24;
%Z72=Za21;
%N1=(KX.^2).*(Z74+Za1-2.*(F21-F11)).*A;
%D1=F21.^2-F11.^2-Z74.*Za1-F11.*(Z74+Za1);
%ZE1=N1./D1-j./(W.*Co);
%ZZ1=abs(ZE1);
%G1=(F11-F21+Z74).*KX./D1;
%G2=(F21-F11-Za1).*KX./D1;
%*****
%* VITESSES U91,U101
%*****
%v9=(G1.*Vs./ZE1);
%V1=(G2.*Vs./ZE1);
%U91=v9;
%U101=V1;
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 3
%*****
c12=ZP3.*vh;
CH2=(c12.*vh.*Kr13./(f.*pi)).*((f./fr3).^N3);
c3=c12+j.*CH2;
K02=W./vh;
K12=Kr13.*((f./fr3).^N3);
go3=(K12+j.*(K02));
ZO3=c3.*go3./(j.*W);
F13=ZO3.*cosh(go3.*ap3)./sinh(go3.*ap3);
F23=ZO3./sinh(go3.*ap3);
KX3=h3./(j.*W.*A3);
N3=(KX3.^2).*(ZA2+Z4-2.*(F23-F13)).*A3;
D3=F23.^2-F13.^2-ZA2.*Z4-F13.*(Z4+ZA2);
ZE3=(N3./D3-j./(W.*Co3));
ZZ3=abs(ZE3);
G13=((F13-F23+Z4).*KX3./D3);
G23=((F23-F13-ZA2).*KX3./D3);
%*****
%* VITESSE U193,U203
%*****
U193=(G13.*Vs./ZE3);
U203=(G23.*Vs./ZE3);
%*****
%* CALCUL VITESSES DES FACES
%*****
for y=1:1:i3
    c1=Z14(y).*v14(y);
    CC2=(c1.*v14(y).*Kr4(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(y));
    c=c1+j.*CC2;

```

```

KKo=W./v14(y);
KK1=Kr4(y).*((f./fr). ^ Nd4(y));
gg=(KK1+j.*KKo);
Zop=c.*gg./(j.*W);
if y==1
    Vn1=U101.*Zop;
    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa5(y))+Z73.*sinh(gg.*aa5(y));
    U111=(Vn1./Vd1);
elseif y==2
    Vn2=U111.*Zop;
    Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa5(y))+Z72.*sinh(gg.*aa5(y));
    U121=(Vn2./Vd2);
elseif y==3
    ZE=Zn2./Zd2;
    Vn3=U121.*Zop;
    Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa5(y))+ZE.*sinh(gg.*aa5(y));
    U131=(Vn3./Vd3);
end
end
Z3=NUN4./DEN4;
Vn4=U131.*Z02;
Vd4=Z02.*cosh(gk1.*ap2)+Z3.*sinh(gk1.*ap2);
U141=(Vn4./Vd4);
for x=1:1:i2
    c1=Z13(x).*v13(x);
    CC2=(c1.*v13(x).*Kr3(x)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd3(x));
    c=c1+j.*CC2;
    Ko=W./v13(x);
    K1=Kr3(x).*((f./fr). ^ Nd3(x));
    gy=(K1+j.*Ko);
    Zg2=c.*gy./(j.*W);
    if x==1
        Vn5=U141.*Zg2;
        Vd5=Zg2.*cosh(gy.*aa4(x))+Z64.*sinh(gy.*aa4(x));
        U151=(Vn5./Vd5);
    elseif x==2
        Vn6=U151.*Zg2;
        Vd6=Zg2.*cosh(gy.*aa4(x))+Z54.*sinh(gy.*aa4(x));
        U161=(Vn6./Vd6);
    elseif x==3
        ZE=Zn3./Zd3;
        Vn7=U161.*Zg2;
        Vd7=Zg2.*cosh(gy.*aa4(x))+ZE.*sinh(gy.*aa4(x));
        U191=(Vn7./Vd7);
    end
end
end
Vn10=U191.*Z03;
Vd10=Z03.*cosh(gk2.*ap3)+Z4.*sinh(gk2.*ap3);
U201=(Vn10./Vd10);
%for p=1:1:i
%   c1=Z12(p).*v12(p);
%   CC2=(c1.*v12(p).*Kr2(p)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd2(p));

```

```

% c=c1+j.*CC2;
% Ko=W./v12(p);
% K1=Kr2(p).*((f./fr).^Nd2(p));
% gy=(K1+j.*Ko);
% Zg2=c.*gy./(j.*W);
% if p==1
%   Vn11=U201.*Zg2;
%   Vd11=Zg2.*cosh(gy.*aa3(p))+Z26.*sinh(gy.*aa3(p));
%   U211=Vn11./Vd11;
% elseif p==2
%   Vn12=U211.*Zg2;
%   Vd12=Zg2.*cosh(gy.*aa3(p))+Z25.*sinh(gy.*aa3(p));
%   U221=Vn12./Vd12;
% elseif p==3
%   ZE=400;
%   Vn13=U221.*Zg2;
%   Vd13=Zg2.*cosh(gy.*aa3(p))+ZE.*sinh(gy.*aa3(p));
%   U231=Vn13./Vd13;
% end
%end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE: PIEZO
%* 2 ACTIF A DROITE
%*****
for y=1:1:i2
    c1=Z13(y).*v13(y);
    CC2=(c1.*v13(y).*Kr3(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd3(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v13(y);
    KK1=Kr3(y).*((f./fr).^Nd3(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1
        Vm1=U142.*Zop;
        Vk1=Zop.*cosh(gg.*aa4(y))+Z64.*sinh(gg.*aa4(y));
        U152=(Vm1./Vk1);
    elseif y==2
        Vm2=U152.*Zop;
        Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa4(y))+Z54.*sinh(gg.*aa4(y));
        U162=(Vm2./Vk2);
    elseif y==3
        ZE=Zn3./Zd3;
        Vm3=U162.*Zop;
        Vk3=Zop.*cosh(gg.*aa4(y))+ZE.*sinh(gg.*aa4(y));
        U192=Vm3./Vk3;
    end
end
Vm6=U192.*Z03;
Vk6=Z03.*cosh(gk2.*ap3)+Z27.*sinh(gk2.*ap3);
U202=(Vm6./Vk6);
%for s=1:1:i
%   c1=Z12(s).*v12(s);

```

```

% CC2=(c1.*v12(s).*Kr2(s)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd2(s));
% c=c1+j.*CC2;
% KKo=W./v12(s);
% KK1=Kr2(s).*((f./fr).^Nd2(s));
% gg=(KK1+j.*KKo);
% Zop=c.*gg./(j.*W);
% if s==1
%     Vm1=U202.*Zop;
%     Vk1=Zop.*cosh(gg.*aa3(s))+Z26.*sinh(gg.*aa3(s));
%     U212=(Vm1./Vk1);
% elseif s==2
%     Vm2=U212.*Zop;
%
%     Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa3(s))+Z25.*sinh(gg.*aa3(s));
%%     U222=(Vm2./Vk2);
% elseif s==3
%     ZE=Zn4./Zd4;
%     Vm3=U222.*Zop;
%     Vk3=Zop.*cosh(gg.*aa3(s))+ZE.*sinh(gg.*aa3(s));
%     U232=(Vm3./Vk3);
% end
%end
%Vm4=U232.*Z04;
%Vk4=Z04.*cosh(gk3.*ap4)+Z2.*sinh(gk3.*ap4);
%U242=(Vm4./Vk4);
%for m2=1:1:id
%     c1=Zo2(m2).*vw2(m2);
%     CC2=(c1.*vw2(m2).*KKr2(m2)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd(m2));
%     c=c1+j.*CC2;
%     KKo=W./vw2(m2);
%     KK1=KKr2(m2).*((f./fr).^Nd(m2));
%     gg=(KK1+j.*KKo);
%     Zop=c.*gg./(j.*W);
%     if m2==1
%         if m2==id
%             Zy=400;
%         end
%         Vm1=U242.*Zop;
%         Vk1=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zy.*sinh(gg.*aa2(m2));
%         U252=(Vm1./Vk1);
%     elseif m2==2
%         if m2==id
%             ZL=400;
%         end
%         Vm2=U252.*Zop;
%         Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+ZL.*sinh(gg.*aa2(m2));
%         U262=(Vm2./Vk2);
%     elseif m2==3
%         if m2==id
%             Zg=400;
%         end
%         Vm2=U262.*Zop;

```

```

%      Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zg.*sinh(gg.*aa2(m2));
%      U272=(Vm2./Vk2);
%      elseif m2==4
%          Zk=400;
%          Vm2=U272.*Zop;
%          Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zk.*sinh(gg.*aa2(m2));
%          U282=(Vm2./Vk2);
%      end
%end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE A DROITE:
%* PIEZO 3 ACTIF
%*****
%for y=1:1:i
%      c1=Z12(y).*v12(y);
%      CC2=(c1.*v12(y).*Kr2(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd2(y));
%      c=c1+j.*CC2;
%      KKo=W./v12(y);
%      KK1=Kr2(y).*((f./fr).^Nd2(y));
%      gg=(KK1+j.*KKo);
%      Zop=c.*gg./(j.*W);
%      if y==1
%          Vn1=V3.*Zop;
%          Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa3(y))+Z26.*sinh(gg.*aa3(y));
%          U213=(Vn1./Vd1);
%      elseif y==2
%          Vn2=U213.*Zop;
%          Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa3(y))+Z25.*sinh(gg.*aa3(y));
%          U223=(Vn2./Vd2);
%      elseif y==3
%          ZE=Zn4./Zd4;
%          Vn3=U223.*Zop;
%          Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa3(y))+ZE.*sinh(gg.*aa3(y));
%          U233=(Vn3./Vd3);
%      end
%end
%Vn4=U233.*Z04;
%Vd4=Z04.*cosh(gk3.*ap4)+Z2.*sinh(gk3.*ap4);
%U243=(Vn4./Vd4);
%for m2=1:1:id
%      c1=Zo2(m2).*vv2(m2);
%      CC2=(c1.*vv2(m2).*KKr2(m2)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd(m2));
%      c=c1+j.*CC2;
%      KKo=W./vv2(m2);
%      KK1=KKr2(m2).*((f./fr).^Nd(m2));
%      gg=(KK1+j.*KKo);
%      Zop=c.*gg./(j.*W);
%      if m2==1
%          if m2==id
%              Zy=400;
%          end
%          Vn1=U243.*Zop;

```



```

% Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zy.*sinh(gg.*aa2(m2));
% U253=(Vn1./Vd1);
% elseif m2==2
% if m2==id
% ZL=400;
% end
% Vn2=U253.*Zop;
% Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+ZL.*sinh(gg.*aa2(m2));
% U263=(Vn2./Vd2);
% elseif m2==3
% if m2==id
% Zg=400;
% end
% Vn2=U263.*Zop;
% Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zg.*sinh(gg.*aa2(m2));
% U273=(Vn2./Vd2);
% elseif m2==4
% Zk=400;
% Vn2=U273.*Zop;
% Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zk.*sinh(gg.*aa2(m2));
% U283=(Vn2./Vd2);
% end
%end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE: PIEZO 4 ACTIF
%* A DROITE
%*****
%for y=1:1:id
% c1=Zo2(y).*vw2(y);
% CC2=(c1.*vw2(y).*KKr2(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd(y));
% c=c1+j.*CC2;
% KKo=W./vw2(y);
% KK1=KKr2(y).*((f./fr).^Nd(y));
% gg=(KK1+j.*KKo);
% Zop=c.*gg./(j.*W);
% if y==1
% if y==id
% Zy=400;
% end
% Vn1=V4.*Zop;
% Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa2(y))+Zy.*sinh(gg.*aa2(y));
% U254=(Vn1./Vd1);
% elseif y==2
% if y==id
% ZL=400;
% end
% Vn2=U254.*Zop;
% Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(y))+ZL.*sinh(gg.*aa2(y));
% U264=(Vn2./Vd2);
% elseif y==3
% if y==id
% Zg=400;

```

```

%     end
%     Vn2=U264.*Zop;
%     Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(y))+Zg.*sinh(gg.*aa2(y));
%     U274=(Vn2./Vd2);
% elseif y==4;
%     Zk=400;
%     Vn2=U274.*Zop;
%     Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(y))+Zk.*sinh(gg.*aa2(y));
%     U284=(Vn2./Vd2);
% end
%end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE: PIEZO 1 ACTIF
%* A GAUCHE
%***\*****
%for j=1:1:ia
%   c1=Zao(y).*va(y);
%   CC2=(c1.*va(y).*Kra(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(y));
%   c=c1+j.*CC2;
%   KKo=W./va(y);
%   KK1=Kra(y).*((f./fr).^Nap(y));
%   gg=(KK1+j.*KKo);
%   Zop=c.*gg./(j.*W);
%   if y==1
%       if y==ia
%           Za2=400;
%       end
%       Vn2=v9.*Zop;
%       Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za2.*sinh(gg.*aa(y));
%       U81=(Vn2./Vd2);
%   elseif y==2
%       if y==ia
%           Za3=400;
%       end
%       Vn2=U81.*Zop;
%       Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za3.*sinh(gg.*aa(y));
%       U71=(Vn2./Vd2);
%   elseif y==3
%       if y==ia
%           Za4=400;
%       end
%       Vn2=U71.*Zop;
%       Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za4.*sinh(gg.*aa(y));
%       U61=(Vn2./Vd2);
%   elseif y==4
%       if y==ia
%           ZE=400;
%       end
%       Vn2=U61.*Zop;
%       Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+ZE.*sinh(gg.*aa(y));
%       U51=(Vn2./Vd2);
%   end
% end

```

```

%end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE: PIEZO 2 ACTIF
%* A GAUCHE
%*****
for t=i3:-1:1
    c1=Z14(t).*v14(t);
    CC2=(c1.*v14(t).*Kr4(t)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(t));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v14(t);
    KK1=Kr4(t).*((f./fr).^Nd4(t));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if t==3
        Vn1=U132.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa5(t))+Za19.*sinh(gg.*aa5(t));
        U122=(Vn1./Vd1);
    elseif t==2
        Vn2=U122.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa5(t))+Za20.*sinh(gg.*aa5(t));
        U112=(Vn2./Vd2);
    elseif t==1
        ZE=Zn1./Zd1;
        Vn3=U112.*Zop;
        Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa5(t))+ZE.*sinh(gg.*aa5(t));
        U102=(Vn3./Vd3);
    end
end
Vn4=U102.*Z01;
Vd4=Z01.*cosh(gp1.*ap)+ZA1.*sinh(gp1.*ap);
U92=(Vn4./Vd4);
%for y=1:1:ia
%    c1=Zao(y).*va(y);
%    CC2=(c1.*va(y).*Kra(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(y));
%    c=c1+j.*CC2;
%    KKo=W./va(y);
%    KK1=Kra(y).*((f./fr).^Nap(y));
%    gg=(KK1+j.*KKo);
%    Zop=c.*gg./(j.*W);
%    if y==1
%        if y==ia
%            Za2=400;
%        end
%        Vn1=U92.*Zop;
%        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za2.*sinh(gg.*aa(y));
%        U82=(Vn1./Vd1);
%    elseif y==2
%        if y==ia
%            Za3=400;
%        end
%        Vn2=U82.*Zop;
%        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za3.*sinh(gg.*aa(y));

```

```

%      U72=(Vn2./Vd2);
%      elseif y==3
%          if y==ia
%              Za4=400;
%          end
%          Vn2=U72.*Zop;
%          Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za4.*sinh(gg.*aa(y));
%          U62=(Vn2./Vd2);
%      elseif y==4
%          if y==ia
%              Zk=400;
%          end
%          Vn2=U62.*Zop;
%          Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Zk.*sinh(gg.*aa(y));
%          U52=(Vn2./Vd2);
%      end
%end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE:
%* PIEZO 3 ACTIF A GAUCHE
%*****
for T1=i2:-1:1
    c1=Z13(T1).*v13(T1);
    CC2=(c1.*v13(T1).*Kr3(T1)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd3(T1));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v13(T1);
    KK1=Kr3(T1).*((f./fr).^Nd3(T1));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if T1==3
        Vn1=U193.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za22.*sinh(gg.*aa4(T1));
        U163=(Vn1./Vd1);
    elseif T1==2
        Vn1=U163.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za21.*sinh(gg.*aa4(T1));
        U153=(Vn1./Vd1);
    elseif T1==1
        ZE=Znn1./Zdd1;
        Vn1=U153.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+ZE.*sinh(gg.*aa4(T1));
        U143=(Vn1./Vd1);
    end
end
Vn1=U143.*Z02;
Vd1=Z02.*cosh(gk1.*ap2)+Za18.*sinh(gk1.*ap2);
U133=(Vn1./Vd1);
for T=i3:-1:1
    c1=Z14(T).*v14(T);
    CC2=(c1.*v14(T).*Kr4(T)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(T));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v14(T);

```

```

KK1=Kr4(T).*((f./fr).^Nd4(T));
gg=(KK1+j.*KKo);
Zop=c.*gg./(j.*W);
if T==3
    Vn1=U133.*Zop;
    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+Za19.*sinh(gg.*aa5(T));
    U123=(Vn1./Vd1);
elseif T==2
    Vn2=U123.*Zop;
    Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+Za20.*sinh(gg.*aa5(T));
    U113=(Vn2./Vd2);
elseif T==1
    ZE=Zn1./Zd1;
    Vn3=U113.*Zop;
    Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+ZE.*sinh(gg.*aa5(T));
    U103=(Vn3./Vd3);
end
end
Vn4=U103.*Z01;
Vd4=Z01.*cosh(gp1.*ap)+ZA1.*sinh(gp1.*ap);
U93=(Vn4./Vd4);
%for y=1:1:ia
% c1=Zao(y).*va(y);
% CC2=(c1.*va(y).*Kra(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(y));
% c=c1+j.*CC2;
% KKo=W./va(y);
% KK1=Kra(y).*((f./fr).^Nap(y));
% gg=(KK1+j.*KKo);
% Zop=c.*gg./(j.*W);
% if y==1
%     if y==ia
%         Za2=400;
%     end
%     Vn1=U93.*Zop;
%     Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za2.*sinh(gg.*aa(y));
%     U83=(Vn1./Vd1);
% elseif y==2
%     if y==id
%         Za3=400;
%     end
%     Vn1=U83.*Zop;
%     Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za3.*sinh(gg.*aa(y));
%     U73=(Vn1./Vd1);
% elseif y==3
%     if y==id
%         Za4=400;
%     end
%     Vn1=U73.*Zop;
%     Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za4.*sinh(gg.*aa(y));
%     U63=(Vn1./Vd1);
% elseif y==4
%     if y==ia

```

```

%      Zk=400;
%      end
%      Vn1=U63.*Zop;
%      Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Zk.*sinh(gg.*aa(y));
%      U53=(Vn1./Vd1);
%      end
%end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE: PIEZO 4 ACTIF
%* A GAUCHE
%*****
%for K=i:-1:1
%  c1=Z12(K).*v12(K);
%  CC2=(c1.*v12(K).*Kr2(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd2(K));
%  c=c1+j.*CC2;
%  KKo=W./v12(K);
%  KK1=Kr2(K).*((f./fr).^Nd2(K));
%  gg=(KK1+j.*KKo);
%  Zop=c.*gg./(j.*W);
%  if K==3
%    Vn1=v23.*Zop;
%    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa3(K))+Za27.*sinh(gg.*aa3(K));
%    U224=(Vn1./Vd1);
%  elseif K==2
%    Vn1=U224.*Zop;
%    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa3(K))+Za26.*sinh(gg.*aa3(K));
%    U214=(Vn1./Vd1);
%  elseif K==1
%    ZE=Znn2./Zdd2;
%    Vn1=U214.*Zop;
%    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa3(K))+ZE.*sinh(gg.*aa3(K));
%    U204=(Vn1./Vd1);
%  end
%end
%Vn1=U204.*Z03;
%Vd1=Z03.*cosh(gk2.*ap3)+Za25.*sinh(gk2.*ap3);
%U194=(Vn1./Vd1);
%for T1=i2:-1:1
%  c1=Z13(T1).*v13(T1);
%  CC2=(c1.*v13(T1).*Kr3(T1)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd3(T1));
%  c=c1+j.*CC2;
%  KKo=W./v13(T1);
%  KK1=Kr3(T1).*((f./fr).^Nd3(T1));
%  gg=(KK1+j.*KKo);
%  Zop=c.*gg./(j.*W);
%  if T1==5
%    Vn1=U194.*Zop;
%    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za24.*sinh(gg.*aa4(T1));
%    U184=(Vn1./Vd1);
%  elseif T1==4
%    Vn1=U184.*Zop;
%    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za23.*sinh(gg.*aa4(T1));

```

```

% U174=(Vn1./Vd1);
% elseif T1==3
% Vn1=U174.*Zop;
% Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za22.*sinh(gg.*aa4(T1));
% U164=(Vn1./Vd1);
% elseif T1==2
% Vn1=U164.*Zop;
% Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za21.*sinh(gg.*aa4(T1));
% U154=(Vn1./Vd1);
% elseif T1==1
% ZE=Znn1./Zdd1;
% Vn1=U154.*Zop;
% Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+ZE.*sinh(gg.*aa4(T1));
% U144=(Vn1./Vd1);
% end
%end
%Vn1=U144.*Z02;
%Vd1=Z02.*cosh(gk1.*ap2)+ZA11.*sinh(gk1.*ap2);
%U134=(Vn1./Vd1);
%for T=i3:-1:1
% c1=Z14(T).*v14(T);
% CC2=(c1.*v14(T).*Kr4(T)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(T));
% c=c1+j.*CC2;
% KKo=W./v14(T);
% KK1=Kr4(T).*((f./fr).^Nd4(T));
% gg=(KK1+j.*KKo);
% Zop=c.*gg./(j.*W);
% if T==3
% Vn1=U134.*Zop;
% Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+Za19.*sinh(gg.*aa5(T));
% U124=(Vn1./Vd1);
% elseif T==2
% Vn2=U124.*Zop;
% Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+Za20.*sinh(gg.*aa5(T));
% U114=(Vn2./Vd2);
% elseif T==1
% ZE=Zn1./Zd1;
% Vn3=U114.*Zop;
% Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+ZE.*sinh(gg.*aa5(T));
% U104=(Vn3./Vd3);
% end
%end
%Vn4=U104.*Z01;
%Vd4=Z01.*cosh(go1.*ap)+ZA1.*sinh(go1.*ap);
%U94=(Vn4./Vd4);
%for y=1:1:ia
% c1=Zao(y).*va(y);
% CC2=(c1.*va(y).*Kra(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(y));
% c=c1+j.*CC2;
% KKo=W./va(y);
% KK1=Kra(y).*((f./fr).^Nap(y));
% gg=(KK1+j.*KKo);

```

```

% Zop=c.*gg./(j.*W);
% if y==1
%     if y==ia
%         Za2=400;
%     end
%     Vn1=U94.*Zop;
%     Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za2.*sinh(gg.*aa(y));
%     U84=(Vn1./Vd1);
% elseif y==2
%     if y==ia
%         Za3=400;
%     end
%     Vn1=U84.*Zop;
%     Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za3.*sinh(gg.*aa(y));
%     U74=(Vn1./Vd1);
% elseif y==3
%     if y==ia
%         Za4=400;
%     end
%     Vn1=U74.*Zop;
%     Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za4.*sinh(gg.*aa(y));
%     U64=(Vn1./Vd1);
% elseif y==4
%     if y==ia
%         Zk=400;
%     end
%     Vn1=U64.*Zop;
%     Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Zk.*sinh(gg.*aa(y));
%     U54=(Vn1./Vd1);
% end
%end
%*****
%* THEOREME DE SUPERPOSITION POUR LES VITESSES
%*****
%U5=abs(U51+U52+U53);
%U6=abs(U61+U62+U63);
%U7=abs(U71+U72+U73);
%U8=abs(U81+U82+U83);
U9=abs(U91+U92+U93);
U10=abs(U101+U102+U103);
U11=abs(U111+U112+U113);
U12=abs(U121+U122+U123);
U13=abs(U131+U132+U133);
U14=abs(U141+U142+U143);
U15=abs(U151+U152+U153);
U16=abs(U161+U162+U163);
%U17=abs(U171+U172+U173);
%U18=abs(U181+U182+U183);
U19=abs(U191+U192+U193);
U20=abs(U201+U202+U203);
%U21=abs(U211+U212+U213);
%U22=abs(U221+U222+U223);

```



```

%U23=abs(U231+U232+U233);
%U24=abs(U241+U242+U243);
%U25=abs(U251+U252+U253);
%U26=abs(U261+U262+U263);
%U27=abs(U271+U272+U273);
%U28=abs(U281+U282+U283);
%*****
%* CALCUL DES VITESSES POUR LES IMPEDANCES
%*****
U1A=U91+U92+U93;
U1B=U101+U102+U103;
U2A=U131+U132+U133;
U2B=U141+U142+U143;
U3A=U191+U192+U193;
U3B=U201+U202+U203;
%*****
%* IMPEDANCE ELECTRIQUE DES TRANSDUCTEURS
%*****
I1=j.*W.*Co.*(Vs-h.*(U1A-U1B))./(j.*W));
I2=j.*W.*Co2.*(Vs-h2.*(U2A-U2B))./(j.*W));
I3=j.*W.*Co3.*(Vs-h3.*(U3A-U3B))./(j.*W));
Z=(Vs./(I1+I2+I3));
X=length(f);
A=0;
for l=1:1:X
    A=A+1;
    if real(Z(A))<0
        ZR(A)=conj(Z(A));
        ZR(A)=-ZR(A);
    else
        ZR(A)=Z(A);
    end
end
ZRT=abs(ZR);
ArgR=(angle(ZR)).*180./pi;
%*****
%* ALGORITHME POUR LE CALCUL MAX-MIN
%*****
npt=length(f);
%*****
%* MAX-MIN POUR L'IMPEDANCE DU RESONATEUR
%*****
D=ZRT(2)-ZRT(1);
if D>0
    Mn=[ZRT(1);f(1)];
    Mx=[];
else
    Mx=[ZRT(1);f(1)];
    Mn=[];
end
l=2;
while l+1<npt

```

```

D=ZRT(l+1)-ZRT(l);
Max=[];
while D>0 & l+1<npt
    Max=[ZRT(l+1);f(l+1)];
    l=l+1;
    D=ZRT(l+1)-ZRT(l);
end
if l+1==npt
    Mx=[Mx[ZRT(l+1);f(l+1)]];
else
    Mx=[Mx Max];
    Min=[];
while D<0 & l+1<npt
    Min=[ZRT(l+1);f(l+1)];
    l=l+1;
    D=ZRT(l+1)-ZRT(l);
end
if l+1==npt
    Mn=[Mn[ZRT(l+1);f(l+1)]];
else
    Mn=[Mn Min];
end
end
end
%*****
%* ALGORITHME POUR LES MAX-MIN PIEZO 1
%*****
D1=ZZ1(2)-ZZ1(1);
if D1>0
    Mn1=[ZZ1(1);f(1)];
    Mx1=[];
else
    Mx1=[ZZ1(1);f(1)];
    Mn1=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D1=ZZ1(l+1)-ZZ1(l);
    Max1=[];
    while D1>0 & l+1<npt
        Max1=[ZZ1(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D1=ZZ1(l+1)-ZZ1(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx1=[Mx1[ZZ1(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx1=[Mx1 Max1];
        Min1=[];
    while D1<0 & l+1<npt
        Min1=[ZZ1(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
    end
end
end

```

```

        D1=ZZ1(l+1)-ZZ1(l);
    end
    if l+1==npt
        Mn1=[Mn1[ZZ1(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mn1=[Mn1 Min1];
    end
end
end
%*****
%* CALCUL MAX-MIN IMPEDANCE PIEZO 2
%*****
D2=ZZ2(2)-ZZ2(1);
if D2>0
    Mn2=[ZZ2(1);f(1)];
    Mx2=[];
else
    Mx2=[ZZ2(1);f(1)];
    Mn2=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D2=ZZ2(l+1)-ZZ2(l);
    Max2=[];
    while D2>0 & l+1<npt
        Max2=[ZZ2(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D2=ZZ2(l+1)-ZZ2(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx2=[Mx2[ZZ2(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx2=[Mx2 Max2];
        Min2=[];
        while D2<0 & l+1<npt
            Min2=[ZZ2(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D2=ZZ2(l+1)-ZZ2(l);
        end
    end
    if l+1==npt
        Mn2=[Mn2[ZZ2(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mn2=[Mn2 Min2];
    end
end
end
%*****
%* CALCUL MAX-MIN IMPEDANCE PIEZO 3
%*****
D3=ZZ3(2)-ZZ3(1);
if D3>0
    Mn3=[ZZ3(1);f(1)];

```

```

    Mx3=[];
else
    Mx3=[ZZ3(1);f(1)];
    Mn3=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D3=ZZ3(l+1)-ZZ3(l);
    Max3=[];
    while D3>0 & l+1<npt
        Max3=[ZZ3(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D3=ZZ3(l+1)-ZZ3(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx3=[Mx3[ZZ3(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx3=[Mx3 Max3];
        Min3=[];
        while D3<0 & l+1<npt
            Min3=[ZZ3(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D3=ZZ3(l+1)-ZZ3(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn3=[Mn3[ZZ3(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn3=[Mn3 Min3];
        end
    end
end
[m,n]=size(Mx);
[q,p]=size(Mn);
[n3,n1]=size(Mx1);
[q4,q1]=size(Mn1);
[t,S]=size(Mx2);
[t1,S1]=size(Mn2);
[x,y]=size(Mx3);
[x1,y1]=size(Mn3);
for X=1:1:100;

```

```

fprintf(' *****\n')
fprintf(' *   UNIVERSITE DU QUEBEC A TROIS RIVIERES   *\n')
fprintf(' *   LABORATOIRE D'ULTRASONIQUE ET CAPTEURS   *\n')
fprintf(' *   RESONATEUR ULTRASONORE : 3 ELEMENTS PIEZOS *\n')
fprintf(' *****\n')
fprintf('*   SOLUTION GRAPHIQUE POUR L IMPEDANCE ET VITESSES *\n')
fprintf(' *****\n')
fprintf('* 1.-IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 1                *\n')
fprintf('* 2.-IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 2                *\n')
fprintf('* 3.-IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 3                *\n')
fprintf('* 4.-IMPEDANCE ELECTRIQUE RESONATEUR              *\n')
fprintf('* 5.-PLUSIEURS GRAPHIQUES SUR L'ECRAN DE L'IMPEDANCE *\n')
fprintf('* 6.-QUELQUES GRAPHIQUES DE VITESSES ACOUSTIQUES *\n')
fprintf('* 7.-VALEURS MAX-MIN IMP. DES TRANSD. ET RESONATEUR *\n')
fprintf('* 8.-VITESSES ACOUSTIQUES AUX DIVERSES INTERFACES *\n')
fprintf(' *****\n')
L=input('CHOISIR GRAPHIQUE (1,2,3,4,5,6,7,8,...),"0" SORTIR DU PROGRAMME=')
if L==0
    break
elseif L==1
    semilogy(f,ZZ1,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 1')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    %grid
    pause
elseif L==2
    semilogy(f,ZZ2,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 2')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    %grid
    pause
elseif L==3
    semilogy(f,ZZ3,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 3')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    %grid
    pause
elseif L==4
    load b:92110511
    axis([10,50,3,7])
    semilogy(z(:,1),z(:,2),f.*1e-3,ZRT,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE RESONATEUR(B9\B12\B10)')
    xlabel('FREQUENCE EN KHz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    %grid
    pause
elseif L==5
    subplot(221),semilogy(f,ZZ1,'r')
    title('Impedance piezo 1')

```

```

xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Impedance en Ohms')
subplot(222),semilogy(f,ZZ2,'g')
title('Impedance piezo 2')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Impedance en Ohms')
subplot(223),semilogy(f,ZZ3,'g')
title('Impedance piezo 3')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Impedance en Ohms')
subplot(224),semilogy(f,RT,'r')
title('Impedance resonateur')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Impedance en Ohms')
pause
clg
hold off
elseif L==6
    fprintf('*****\n')
    fprintf('* GRAPHIQUES DE 4 VITESSES ACOUSTIQUES U9 U12 U16 U17 * \n')
    fprintf('*****\n')
    pause(3)
    subplot(221),semilogy(f,U9,'g')
    title('Vitesse acoustique U9')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    subplot(222),semilogy(f,U12,'g')
    title('Vitesse acoustique U12')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    subplot(223),semilogy(f,U16,'g')
    title('Vitesse acoustique U16')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    subplot(224),semilogy(f,U17,'g')
    title('Vitesse acoustique U17')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Arg. en degres')
    pause
    clg
    hold off
elseif L==7
    for T=1:1:n1
        fprintf('*****\n')
        fprintf('* VALEURS MAX. DE ZZ1 * \n')
        fprintf('*****\n')
        fprintf('Valeur MaxZ=%e\n',Mx1(1,T))
        fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mx1(2,T))
        pause
    end
    pause
    for M=1:1:q1

```

```

fprintf('*****\n')
fprintf('*    VALEUR MIN. DE ZZ1        *\n')
fprintf('*****\n')
fprintf('Valeur MinZ=%e\n',Mn1(1,M))
fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mn1(2,M))
pause
end
pause
for R=1:1:S
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*    VALEUR MAX. DE ZZ2        *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('Valeur MaxZ=%e\n',Mx2(1,R))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mx2(2,R))
    pause
end
pause
for M=1:1:S1
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*    VALEUR MIN.DE ZZ2        *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('Valeur MinZ=%e\n',Mn2(1,M))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mn2(2,M))
    pause
end
pause
for K=1:1:y
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*    VALEUR MAX.DE ZZ3        *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('Valeur MaxZ=%e\n',Mx3(1,K))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mx3(2,K))
    pause
end
pause
for G=1:1:y1
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*    VALEUR MIN.DE ZZ3        *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('Valeur MinZ=%e\n',Mn3(1,G))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mn3(2,G))
    pause
end
pause
for K=1:1:n
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*    VALEUR MAX. DE ZRT        *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('Valeur MaxZ=%e\n',Mx(1,K))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mx(2,K))
    pause
end

```

```

pause
for R=1:1:p
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*      VALEUR MIN. DE ZRT      *\n')
    fprintf('*****\n')
    fprintf('Valeur MinZ=%e\n',Mn(1,R))
    fprintf('Valeur Freq=%e\n',Mn(2,R))
    pause
end
pause
elseif L==0
    fprintf('FIN DE CALCUL\n')
    break
elseif L==8
    p=input('QUELLE VITESSE=')
    if p==5
        U=U5;
        semilogy(f,U5)
        title('Vitesse acoustique U5')
        xlabel('Frequence en Hz')
        ylabel('Vitesse en m/s')
    elseif p==6
        U=U6;
        semilogy(f,U6)
        title('Vitesse acoustique U6')
        xlabel('Frequence en Hz')
        ylabel('Vitesse en m/s')
    elseif p==7
        U=U7;
        semilogy(f,U7)
        title('Vitesse acoustique U7')
        xlabel('Frequence en Hz')
        ylabel('Vitesse en m/s')
    elseif p==8
        U=U8;
        semilogy(f,U8)
        title('Vitesse acoustique U8')
        xlabel('frequence en Hz')
        ylabel('Vitesse en m/s')
    elseif p==9
        U=U9;
        semilogy(f,U9)
        title('Vitesse acoustique U9')
        xlabel('Frequence en Hz')
        ylabel('Vitesse en m/s')
    elseif p==10
        U=U10;
        semilogy(f,U10)
        title('Vitesse acoustique U10')
        xlabel('Frequence en Hz')
        ylabel('Vitesse en m/s')
    elseif p==11

```



```

U=U11;
semilogy(f,U11)
title('Vitesse acoustique U11')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==12
    U=U12;
    semilogy(f,U12)
    title('Vitesse acoustique U12')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==13
    U=U13;
    semilogy(f,U13)
    title('Vitesse acoustique U13')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==14
    U=U14;
    semilogy(f,U14)
    title('Vitesse acoustique U14')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==15
    U=U15;
    semilogy(f,U15)
    title('Vitesse acoustique U15')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==16
    U=U16;
    semilogy(f,U16)
    title('Vitesse acoustique U16')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==17
    U=U17;
    semilogy(f,U17)
    title('Vitesse acoustique U17')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==18
    U=U18;
    semilogy(f,U18)
    title('Vitesse acoustique U18')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==19
    U=U19;
    semilogy(f,U19)
    title('Vitesse acoustique U19')
    xlabel('Frequence en Hz')

```

```

        ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==20
    U=U20;
    semilogy(f,U20)
    title('Vitesse acoustique U20')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==21
    U=U21;
    semilogy(f,U21)
    title('Vitesse acoustique U21')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==22
    U=U22;
    semilogy(f,U22)
    title('Vitesse acoustique U22')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==23
    U=U23;
    semilogy(f,U23)
    title('Vitesse acoustique U23')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
elseif p==24
    U=U24;
    semilogy(f,U24)
    title('Vitesse acoustique U24')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
end
pause
F=input('Vous voulez les max-min de la vitesse(1/0)=')
if F==1
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*      CALCUL EN COURS      *\n')
    fprintf('*****\n')
    VITESSE
    for R=1:1:N
        fprintf('*****\n')
        fprintf('* VALEURS MAX. DE LA VITESSE      *\n')
        fprintf('*****\n')
        fprintf('Valeur MaxU=%e\n',Mx(1,R))
        fprintf('Valeur Freq.=%e\n',Mx(2,R))
        pause
    end
    for R=1:1:L
        fprintf('*****\n')
        fprintf('* VALEURS MIN. DE LA VITESSE      *\n')
        fprintf('*****\n')
        fprintf('Valeur MinU=%e\n',Mn(1,R))

```

```

    fprintf('Valeur Freq.=%e\n', Mn(2,R))
    pause
end
elseif F==0
    fprintf('Une autre vitesse\n')
end
end
end
end
end
end
fprintf('VOUS POUVEZ VERIFIER TOUTES LES VARIABLES MAINTENANT\n')
end

```

```

%*****\n')
%* PROGRAMME POUR LE CALCUL DE MAX-MIN DE VITESSES *\n')
%*****\n')
npt=length(f);
D=U(2)-U(1);
if D>0
    Mn=[U(1);f(1)];
    Mx=[];
else
    Mx=[U(1);f(1)];
    Mn=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D=U(l+1)-U(l);
    Max=[];
    while D>0 & l+1<npt
        Max=[U(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D=U(l+1)-U(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx=[Mx U(l+1);f(l+1)];
    else
        Mx=[Mx Max];
        Min=[];
        while D<0 & l+1<npt
            Min=[U(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D=U(l+1)-U(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn=[Mn U(l+1);f(l+1)];
        else
            Mn=[Mn Min];
        end
    end
end
[M,N]=size(Mx);
[K,L]=size(Mn);

```

Organigramme de la boucle d'un résonateur composé par deux transducteurs en parallèle électriquement

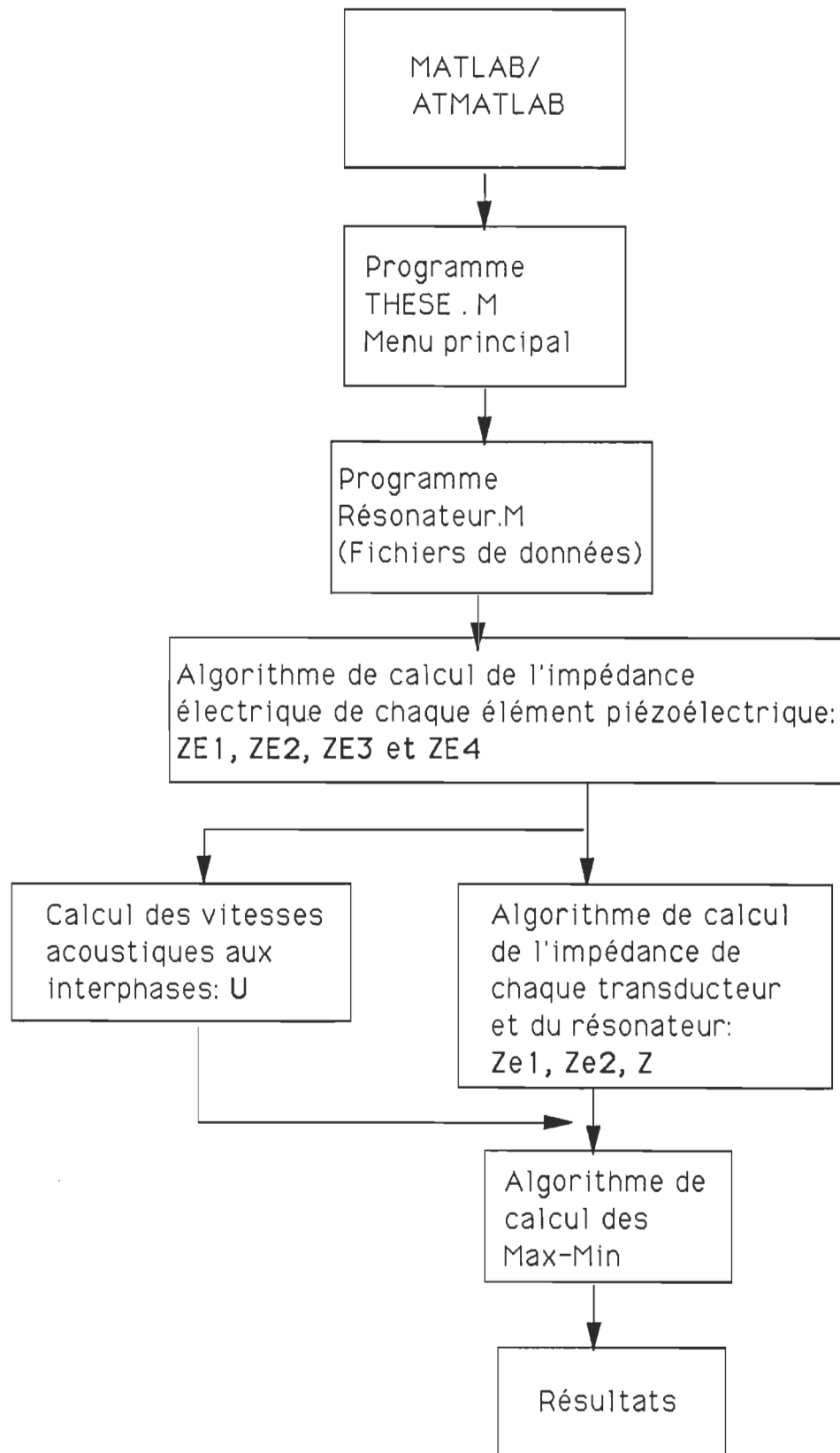


Figure 58 Organigramme de la boucle d'un résonateur composé.

```

%*****
%*PROGRAMME POUR CALCULER LES VARIABLES D'UN RESONATEUR COMPOSE
%*PAR DEUX TRANSDUCTEURS EN PARALLELE.      NOVEMBRE.1992
%*****
fprintf('*****\n')
fprintf('*   CALCUL EN COURS   *\n')
fprintf('*****\n')
%=====
%*                               DONNEES DU PROBLEME
%=====
%*****
Fi=fi;
Fs=fs;
Ni=ni;
%*****PLAGE DE FREQUENCE*****
f=Fi:(Fs-Fi)/Ni:Fs;
%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL
%*****
W=2*pi.*f;
%*****
%*ALGORITHME DE CALCUL : PREMIER CAS PIEZO 1 ACTIF
%*****
%*  DONNEES ELEMENT PIEZO 2
%*****
v2=ve2;
c1=ZP2.*v2;
C20=(c1.*v2.*Kr12./(f.*pi)).*((f./fr2).^ N2);
ca1=c1+j.*C20;
K00=W./v2;
K10=Kr12.*((f./fr2).^ N2);
gk1=(K10+j.*(K00));
Z02=ca1.*gk1./(j.*W);
%*****
%*  DONNEES ELEMENT PIEZO 3
%*****
v3=ve3;
c2=ZP3.*v3;
C30=(c2.*v3.*Kr13./(f.*pi)).*((f./fr3).^ N3);
ca2=c2+j.*C30;
K01=W./v3;
K20=Kr13.*((f./fr3).^ N3);
gk2=(K20+j.*(K01));
Z03=ca2.*gk2./(j.*W);
%*****
%*  DONNEES ELEMENT PIEZO 4
%*****
v4=ve4;
c3=ZP4.*v4;
C40=(c3.*v4.*Kr14./(f.*pi)).*((f./fr4).^ N4);
ca3=c3+j.*C40;
K02=W./v4;

```

```

K30=Kr14.*((f./fr4). ^ N4);
gk3=(K30+j.*(K02));
Z04=ca3.*gk3./(j.*W);
%*****
%* CALCUL DE L'IMPEDANCE A DROITE PIEZO 1
%*****
%* CALCUL DE L'IMPEDANCE D'ENTREE PIEZO 4
%*****
for m2=id:-1:1;
    c11=Zo2(m2).*vv2(m2);
    C21=(c11.*vv2(m2).*KKr2(m2)./(f.*pi)).*((f./fr2). ^ Nd(m2));
    c2=c11+j.*C21;
    Koo=W./vv2(m2);
    K12=KKr2(m2).*((f./fr2). ^ Nd(m2));
    g2=(K12+j.*(Koo));
    Zo21=c2.*g2./(j.*W);
    NUN2=(Z2+Zo21.*tanh(g2.*aa2(m2))).*Zo21;
    DEN2=(Zo21+Z2.*tanh(g2.*aa2(m2)));
    if m2==4,
        Zg=NUN2./DEN2;
        Z2=Zg;
    elseif m2==3,
        ZL=NUN2./DEN2;
        Z2=ZL;
    elseif m2==2,
        Zy=NUN2./DEN2;
        Z2=Zy;
    elseif m2==1,
        Zf=NUN2./DEN2;
        Z2=Zf;
    end
end
Zn4=(Zf+Z04.*tanh(gk3.*ap4)).*Z04;
Zd4=(Z04+Zf.*tanh(gk3.*ap4));
Z4=Zn4./Zd4;
%*****
%* CALCUL DE L'IMPEDANCE D'ENTREE A L'ELEMENT PIEZO 3
%*****
for K=i:-1:1;
    c12=Z12(K).*v12(K);
    C22=(c12.*v12(K).*Kr2(K)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd2(K));
    c21=c12+j.*C22;
    KK=W./v12(K);
    K22=Kr2(K).*((f./fr). ^ Nd2(K));
    g3=(K22+j.*(KK));
    Zo3=c21.*g3./(j.*W);
    NUN3=(Z4+Zo3.*tanh(g3.*aa3(K))).*Zo3;
    DEN3=(Zo3+Z4.*tanh(g3.*aa3(K)));
    if K==4,
        Z24=NUN3./DEN3;
        Z4=Z24;
    elseif K==3,

```

```

        Z25=NUN3./DEN3;
        Z4=Z25;
    elseif K==2,
        Z26=NUN3./DEN3;
        Z4=Z26;
    elseif K==1,
        Z27=NUN3./DEN3;
        Z4=Z27;
    end
end
Zn3=(Z4+Z03.*tanh(gk2.*ap3)).*Z03;
Zd3=(Z03+Z4.*tanh(gk2.*ap3));
Z3=Zn3./Zd3;
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE D ENTREE A L ELEMENT PIEZO 2
%*****
for K2=i2:-1:1
    c13=Z13(K2).*v13(K2);
    C23=(c13.*v13(K2).*Kr3(K2)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd3(K2));
    c31=c13+j.*C23;
    KK1=W./v13(K2);
    K23=Kr3(K2).*((f./fr).^Nd3(K2));
    g4=(K23+j.*(KK1));
    Zo4=c31.*g4./(j.*W);
    NUN4=(Z3+Zo4.*tanh(g4.*aa4(K2))).*Zo4;
    DEN4=(Zo4+Z3.*tanh(g4.*aa4(K2)));
    if K2==5
        Z34=NUN4./DEN4;
        Z3=Z34;
    elseif K2==4
        Z44=NUN4./DEN4;
        Z3=Z44;
    elseif K2==3
        Z54=NUN4./DEN4;
        Z3=Z54;
    elseif K2==2
        Z64=NUN4./DEN4;
        Z3=Z64;
    elseif K2==1
        Z3=NUN4./DEN4;
    end
end
Zn2=(Z3+Z02.*tanh(gk1.*ap2)).*Z02;
Zd2=(Z02+Z3.*tanh(gk1.*ap2));
Ze2=Zn2./Zd2;
%*****
%* CALCUL DE L'IMPEDANCE A DROITE DU PIEZO 1
%*****
for K3=i3:-1:1
    c14=Z14(K3).*v14(K3);
    C33=(c14.*v13(K3).*Kr4(K3)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(K3));
    c41=c14+j.*C33;

```



```

KK2=W./v14(K3);
K33=Kr4(K3).*((f./fr). ^ Nd4(K3));
g5=(K33+j.*(KK2));
Zo5=c41.*g5./(j.*W);
NUN5=(Ze2+Zo5.*tanh(g5.*aa5(K3))).*Zo5;
DEN5=(Zo5+Ze2.*tanh(g5.*aa5(K3)));
if K3==4
    Z71=NUN5./DEN5;
    Ze2=Z71;
elseif K3==3
    Z72=NUN5./DEN5;
    Ze2=Z72;
elseif K3==2
    Z73=NUN5./DEN5;
    Ze2=Z73;
elseif K3==1
    Z74=NUN5./DEN5;
    Ze2=Z74;
end
end
%*****
%*  CALCUL DE L IMPEDANCE A GAUCHE DU PIEZO 1
%*****
for ik=ia:-1:1;
    c1=Zao(ik).*va(ik);
    C2=(c1.*va(ik)*Kra(ik)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nap(ik));
    c=c1+j.*C2;
    Koa=W./va(ik);
    K1a=Kra(ik).*((f./fr). ^ Nap(ik));
    ga=(K1a+j.*(Koa));
    Zoo=c.*ga./(j.*W);
    NUNa=(ZA1+Zoo.*tanh(ga.*aa(ik))).*Zoo;
    DENa=(Zoo+ZA1.*tanh(ga.*aa(ik)));
    if ik==4,
        Za4=NUNa./DENa;
        ZA1=Za4;
    elseif ik==3,
        Za3=NUNa./DENa;
        ZA1=Za3;
    elseif ik==2,
        Za2=NUNa./DENa;
        ZA1=Za2;
    elseif ik==1,
        Za1=NUNa./DENa;
        ZA1=Za1;
    end
end
%*****
%*  CALCUL DE L'IMPEDANCE ELECTRIQUE DU PIEZO 1
%*****
c10=ZP1.*vt;
CH=(c10.*vt.*Krr./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nn);

```

```

ct1=c10+j.*CH;
K00=W./vt;
K10=Krr.*((f./fr). ^ Nn);
go1=(K10+j.*(K00));
ZO1=ct1.*go1./(j.*W);
F11=ZO1.*cosh(go1.*ap)./sinh(go1.*ap);
F21=ZO1./sinh(go1.*ap);
KX=h./(j.*W.*A);
%N1=(KX. ^ 2).*(Z74+Za1-2*(F21-F11))*A;
%D1=F21. ^ 2-F11. ^ 2-Z74.*Za1-F11.*(Z74+Za1);
%ZE1=(N1./D1-j./(W.*Co));
%ZZ1=abs(ZE1);
%G1=((F11-F21+Z74).*KX./D1);
%G2=((F21-F11-Za1).*KX./D1);
%* *****
%* VITESSE U91,U101
%*****
%U91=(G1.*Vs./ZE1);
%U101=(G2.*Vs./ZE1);
%U911=v9;
%U101=V1;
%*****
%* DEUXIEME CAS: PIEZO 2 ACTIF
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE D'ENTREE PIEZO 1 A GAUCHE
%*****
c10=ZP1.*ve1;
CH=(c10.*ve1.*Krr./((f.*pi)).*((f./fr). ^ Nn);
c1=c10+j.*CH;
K10=Krr.*((f./fr). ^ Nn);
K00=W./ve1;
go1=(K10+j.*(K00));
Z01=c1.*go1./(j.*W);
Zn1=(ZA1+Z01.*tanh(go1.*ap)).*Z01;
Zd1=(Z01+ZA1.*tanh(go1.*ap));
ZA11=Zn1./Zd1;
Zee1=Zn1./Zd1;
ZA11=Zn4./Zd4;
%*****
%**CALCUL DE L IMPEDANCE A GAUCHE DU PIEZO 2
%*****
for T=1:i3;
ca1=Z14(T).*v14(T);
Ca1=(ca1.*v14(T).*Kr4(T)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd4(T));
CD=(ca1+j.*Ca1);
Ka1=W./v14(T);
K1a=Kr4(T).*((f./fr2). ^ Nd4(T));
ga1=(K1a+j.*(Ka1));
X=CD.*ga1;
P=j.*W;
Zoa=X./P;
NUNa1=(ZA11+Zoa.*tanh(ga1.*aa5(T))).*Zoa;

```

```

DENa1=(Zoa+ZA11.*tanh(ga1.*aa5(T)));
if T==1,
    Za20=NUNa1./DENa1;
    ZA11=Za20;
elseif T==2,
    Za19=NUNa1./DENa1;
    ZA11=Za19;
elseif T==3,
    Za18=NUNa1./DENa1;
    ZA11=Za18;
end
end
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 2
%*****
c11=ZP2.*vr;
CH1=(c11.*vr.*Kr12./((f.*pi)).*((f./fr2).^N2);
c2=c11+j.*CH1;
K01=W./vr;
K11=Kr12.*((f./fr2).^N2);
go2=(K11+j.*(K01));
ZO2=c2.*go2./(j.*W);
F12=ZO2.*cosh(go2.*ap2)./sinh(go2.*ap2);
F22=ZO2./sinh(go2.*ap2);
Kx2=h2./(j.*W.*A2);
N2=(Kx2.^2).*(ZA11+Z3-2.*(F22-F12)).*A2;
D2=F22.^2-F12.^2-ZA11.*Z3-F12.*(Z3+ZA11);
ZE2=(N2./D2-j./(W.*Co2));
ZZ2=abs(ZE2);
G12=((F12-F22+Z3).*Kx2./D2);
G22=((F22-F12-ZA11).*Kx2./D2);
%FF=A2.*Kx2.*(G12-G22);
%ZE2=FF-j./(W.*Co);
%ZZ2=abs(ZE2);
%*****
%*      VITESSE U132,U142
%*****
U132=(G12.*Vs./ZE2);
U142=(G22.*Vs./ZE2);
%U132=wv13;
%U142=V2;
%*****
%* TROISIEME CAS : PIEZO 3 ACTIF
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE D ENTREE PIEZO 2 A GAUCHE
%*****
Znn1=(ZA11+ZO2.*tanh(gk1.*ap2)).*ZO2;
Zdd1=(ZO2+ZA11.*tanh(gk1.*ap2));
ZA2=Znn1./Zdd1;
Zea2=ZA2;

```

```

%*****
%* CALCUL IMPEDANCE A GAUCHE PIEZO 3
%*****
for T1=1:1:i2
    ca2=Z13(T1).*v13(T1);
    Ca2=(ca2.*v13(T1).*Kr3(T1)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd3(T1));
    CA=ca2+j.*Ca2;
    Ka2=W./v13(T1);
    K2a=Kr3(T1).*((f./fr2). ^ Nd3(T1));
    ga2=(K2a+j.*Ka2);
    X1=CA.*ga2;
    P1=j.*W;
    Zoa1=X1./P1;
    NUNa2=(ZA2+Zoa1.*tanh(ga2.*aa4(T1))).*Zoa1;
    DENa2=(Zoa1+ZA2.*tanh(ga2.*aa4(T1)));
    if T1==1
        Za21=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za21;
    elseif T1==2
        Za22=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za22;
    elseif T1==3
        Za23=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za23;
    elseif T1==4
        Za24=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za24;
    elseif T1==5
        Za25=NUNa2./DENa2;
        ZA2=Za25;
    end
end
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 3
%*****
c12=ZP3.*vh;
CH2=(c12.*vh.*Kr13./(f.*pi)).*((f./fr3). ^ N3);
c3=c12+j.*CH2;
K02=W./vh;
K12=Kr13.*((f./fr3). ^ N3);
go3=(K12+j.*(K02));
ZO3=c3.*go3./(j.*W);
F13=ZO3.*cosh(go3.*ap3)./sinh(go3.*ap3);
F23=ZO3./sinh(go3.*ap3);
KX3=h3./(j.*W.*A3);
N3=(KX3. ^ 2).*(ZA2+Z4-2.*(F23-F13)).*A3;
D3=F23. ^ 2-F13. ^ 2-ZA2.*Z4-F13.*(Z4+ZA2);
ZE3=(N3./D3-j./(W.*Co3));
ZZ3=abs(ZE3);
G13=((F13-F23+Z4).*KX3./D3);
G23=((F23-F13-ZA2).*KX3./D3);
%FF=A.*KX3.*(G13-G23);

```

```

%ZE3=FF-j./(W.*Co);
%ZZ3=abs(ZE3);
%*****
%*      VITESSE U193,U203
%*****
U193=(G13.*Vs./ZE3);
U203=(G23.*Vs./ZE3);
%U193=v19;
%U203=V3;
%*****
%* QUATRIEME CAS : PIEZO 4 ACTIF
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE D ENTREE PIEZO 3 A GAUCHE
%*****
Znn2=(ZA2+Z03.*tanh(gk2.*ap3)).*Z03;
Zdd2=(Z03+ZA2.*tanh(gk2.*ap3));
ZA3=Znn2./Zdd2;
Zea3=Znn2./Zdd2;
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE A GAUCHE DU PIEZO 4
%*****
for T2=1:1:i
    ca3=Z12(T2).*v12(T2);
    Ca3=(ca3.*v12(T2).*Kr2(T2))./((f.*pi)).*((f./fr).^Nd2(T2));
    CB=ca3+j.*Ca3;
    Ka3=W./v12(T2);
    K3a=Kr2(T2).*((f./fr).^Nd2(T2));
    ga3=(K3a+j.*Ka3);
    Zoa2=CB.*ga3./(j.*W);
    %P2=j.*W;
    %Zoa2=X2./P2;
    NUNa3=(ZA3+Zoa2.*tanh(ga3.*aa3(T2))).*Zoa2;
    DENa3=(Zoa2+ZA3.*tanh(ga3.*aa3(T2)));
    if T2==1,
        Za26=NUNa3./DENa3;
        ZA3=Za26;
    elseif T2==2,
        Za27=NUNa3./DENa3;
        ZA3=Za27;
    elseif T2==3,
        Za28=NUNa3./DENa3;
        ZA3=Za28;
    end
end
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE ELECT. PIEZO PAR SIMETRIE
%*****
Z74=Za28;
Z72=Za26;
Z73=Za27;
Za1=Zf;
N1=(KX.^2).*(Z74+Za1-2.*(F21-F11)).*A;

```

```

D1=F21.^2-F11.^2-Z74.*Za1-F11.*(Z74+Za1);
ZE1=(N1./D1-j./(W.*Co));
ZZ1=abs(ZE1);
G1=(F11-F21+Z74).*KX./D1;
G2=(F21-F11-Za1).*KX./D1;
%*****
%* VITESSES U91,U101 PAR SIMETRIE
%*****
U91=(G1.*Vs./ZE1);
U101=(G2.*Vs./ZE1);
%*****
%* CALCUL IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 4
%*****
c13=ZP4.*vk;
CH3=(c13.*vk.*Kr14./(f.*pi)).*((f./fr4).^N4);
c4=c13+j.*CH3;
K03=W./vk;
K13=Kr14.*((f./fr4).^N4);
go4=(K13+j.*(K03));
ZO4=c4.*go4./(j.*W);
F14=ZO4.*cosh(go4.*ap4)./sinh(go4.*ap4);
F24=ZO4./sinh(go4.*ap4);
KX4=h4./(j.*W.*A4);
N4=(KX4.^2).*(Za28+Zf-2.*(F24-F14)).*A4;
D4=F24.^2-F14.^2-Za28.*Zf-F14.*(Za28+Zf);
ZE4=(N4./D4-j./(W.*Co4));
ZZ4=abs(ZE4);
G14=((F14-F24+Zf).*KX4./D4);
G24=((F24-F14-Za28).*KX4./D4);
%FF=A4.*KX4.*(G14-G24);
%ZE4=FF-j./(W.*Co4);
%ZZ4=abs(ZE4);
%*****
%*      VITESSE U234,U244
%*****
U234=(G14.*Vs./ZE4);
U244=(G24.*Vs./ZE4);
%U234=v23;
%U244=V4;
%*****
%*      CALCUL VITESSES DES FACES
%*****
for y=1:1:i3
    c1=Z14(y).*v14(y);
    CC2=(c1.*v14(y).*Kr4(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v14(y);
    KK1=Kr4(y).*((f./fr).^Nd4(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1
        Vn1=U101.*Zop;
    end
end

```

```

    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa5(y))+Z73.*sinh(gg.*aa5(y));
    U111=(Vn1./Vd1);
elseif y==2
    Vn2=U111.*Zop;
    Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa5(y))+Z72.*sinh(gg.*aa5(y));
    U121=(Vn2./Vd2);
elseif y==3
    %ZE=Zn2./Zd2;
    Vn3=U121.*Zop;
    Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa5(y))+(Zn2./Zd2).*sinh(gg.*aa5(y));
    U131=(Vn3./Vd3);
end
end
%Z3=NUN4./DEN4;
Vn4=U131.*Z02;
Vd4=Z02.*cosh(gk1.*ap2)+(NUN4./DEN4).*sinh(gk1.*ap2);
U141=(Vn4./Vd4);
for x=1:1:i2
    c1=Z13(x).*v13(x);
    CC2=(c1.*v13(x).*Kr3(x)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd3(x));
    c=c1+j.*CC2;
    Ko=W./v13(x);
    K1=Kr3(x).*((f./fr).^Nd3(x));
    gy=(K1+j.*Ko);
    Zg2=c.*gy./(j.*W);
    if x==1
        Vn5=U141.*Zg2;
        Vd5=Zg2.*cosh(gy.*aa4(x))+Z64.*sinh(gy.*aa4(x));
        U151=(Vn5./Vd5);
    elseif x==2
        Vn6=U151.*Zg2;
        Vd6=Zg2.*cosh(gy.*aa4(x))+Z54.*sinh(gy.*aa4(x));
        U161=(Vn6./Vd6);
    elseif x==3
        Vn7=U161.*Zg2;
        Vd7=Zg2.*cosh(gy.*aa4(x))+Z44.*sinh(gy.*aa4(x));
        U171=(Vn7./Vd7);
    elseif x==4
        Vn8=U171.*Zg2;
        Vd8=Zg2.*cosh(gy.*aa4(x))+Z34.*sinh(gy.*aa4(x));
        U181=(Vn8./Vd8);
    elseif x==5
        ZE=Zn3./Zd3;
        Vn9=U181.*Zg2;
        Vd9=Zg2.*cosh(gy.*aa4(x))+ZE.*sinh(gy.*aa4(x));
        U191=(Vn9./Vd9);
    end
end
Vn10=U191.*Z03;
Vd10=Z03.*cosh(gk2.*ap3)+Z4.*sinh(gk2.*ap3);
U201=(Vn10./Vd10);
for p=1:1:i

```

```

c1=Z12(p).*v12(p);
CC2=(c1.*v12(p).*Kr2(p)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd2(p));
c=c1+j.*CC2;
Ko=W./v12(p);
K1=Kr2(p).*((f./fr). ^ Nd2(p));
gy=(K1+j.*Ko);
Zg2=c.*gy./(j.*W);
if p==1
    Vn11=U201.*Zg2;
    Vd11=Zg2.*cosh(gy.*aa3(p))+Z26.*sinh(gy.*aa3(p));
    U211=(Vn11./Vd11);
elseif p==2
    Vn12=U211.*Zg2;
    Vd12=Zg2.*cosh(gy.*aa3(p))+Z25.*sinh(gy.*aa3(p));
    U221=(Vn12./Vd12);
elseif p==3
    ZE=Zn4./Zd4;
    Vn13=U221.*Zg2;
    Vd13=Zg2.*cosh(gy.*aa3(p))+ZE.*sinh(gy.*aa3(p));
    U231=(Vn13./Vd13);
end
end
Vn14=U231.*Z02;
Vd14=Z02.*cosh(gk3.*ap4)+Z2.*sinh(gk3.*ap4);
U241=(Vn14./Vd14);
for n=1:1:id
    c1=Zo2(n).*w2(n);
    CC2=(c1.*w2(n).*KKr2(n)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd(n));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./w2(n);
    KK1=KKr2(n).*((f./fr). ^ Nd(n));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if n==1
        if n==id
            Zy=400;
        end
        Vn16=U241.*Zop;
        Vd16=Zop.*cosh(gg.*aa2(n))+Zy.*sinh(gg.*aa2(n));
        U251=(Vn16./Vd16);
    elseif n==2
        if n==id
            ZL=400;
        end
        Vn17=U251.*Zop;
        Vd17=Zop.*cosh(gg.*aa2(n))+ZL.*sinh(gg.*aa2(n));
        U261=(Vn17./Vd17);
    elseif n==3
        if n==id
            Zg=400;
        end
        Vn18=U261.*Zop;

```



```

Vd18=Zop.*cosh(gg.*aa2(n))+Zg.*sinh(gg.*aa2(n));
U271=(Vn18./Vd18);
elseif n==4
    Zk=400;
    Vn19=U271.*Zop;
    Vd19=Zop.*cosh(gg.*aa2(n))+Zk.*sinh(gg.*aa2(n));
    U281=(Vn19./Vd19);
end
end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE:
%* PIEZO 2 ACTIF A DROITE
%*****
for y=1:1:i2
    c1=Z13(y).*v13(y);
    CC2=(c1.*v13(y).*Kr3(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd3(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v13(y);
    KK1=Kr3(y).*((f./fr).^Nd3(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1
        Vm1=U142.*Zop;
        Vk1=Zop.*cosh(gg.*aa4(y))+Z64.*sinh(gg.*aa4(y));
        U152=(Vm1./Vk1);
    elseif y==2
        Vm2=U152.*Zop;
        Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa4(y))+Z54.*sinh(gg.*aa4(y));
        U162=(Vm2./Vk2);
    elseif y==3
        Vm3=U162.*Zop;
        Vk3=Zop.*cosh(gg.*aa4(y))+Z44.*sinh(gg.*aa4(y));
        U172=Vm3./Vk3;
    elseif y==4
        Vm4=U172.*Zop;
        Vk4=Zop.*cosh(gg.*aa4(y))+Z34.*sinh(gg.*aa4(y));
        U182=(Vm4./Vk4);
    elseif y==5
        ZE=Zn3./Zd3;
        Vm5=U182.*Zop;
        Vk5=Zop.*cosh(gg.*aa4(y))+ZE.*sinh(gg.*aa4(y));
        U192=(Vm5./Vk5);
    end
end
Vm6=U192.*Z03;
Vk6=Z03.*cosh(gk2.*ap3)+Z27.*sinh(gk2.*ap3);
U202=(Vm6./Vk6);
for s=1:1:i
    c1=Z12(s).*v12(s);
    CC2=(c1.*v12(s).*Kr2(s)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd2(s));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v12(s);

```

```

KK1=Kr2(s).*((f./fr).^Nd2(s));
gg=(KK1+j.*KKo);
Zop=c.*gg./(j.*W);
if s==1
    Vm1=U202.*Zop;
    Vk1=Zop.*cosh(gg.*aa3(s))+Z26.*sinh(gg.*aa3(s));
    U212=(Vm1./Vk1);
elseif s==2
    Vm2=U212.*Zop;
    Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa3(s))+Z25.*sinh(gg.*aa3(s));
    U222=(Vm2./Vk2);
elseif s==3
    ZE=Zn4./Zd4;
    Vm3=U222.*Zop;
    Vk3=Zop.*cosh(gg.*aa3(s))+ZE.*sinh(gg.*aa3(s));
    U232=(Vm3./Vk3);
end
end
Vm4=U232.*Z04;
Vk4=Z04.*cosh(gk3.*ap4)+Z2.*sinh(gk3.*ap4);
U242=(Vm4./Vk4);
for m2=1:1:id
    c1=Zo2(m2).*vv2(m2);
    CC2=(c1.*vv2(m2).*KKr2(m2)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd(m2));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./vv2(m2);
    KK1=KKr2(m2).*((f./fr).^Nd(m2));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if m2==1
        if m2==id
            Zy=400;
        end
        Vm1=U242.*Zop;
        Vk1=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zy.*sinh(gg.*aa2(m2));
        U252=(Vm1./Vk1);
    elseif m2==2
        if m2==id
            ZL=400;
        end
        Vm2=U252.*Zop;
        Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+ZL.*sinh(gg.*aa2(m2));
        U262=(Vm2./Vk2);
    elseif m2==3
        if m2==id
            Zg=400;
        end
        Vm2=U262.*Zop;
        Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zg.*sinh(gg.*aa2(m2));
        U272=(Vm2./Vk2);
    elseif m2==4
        Zk=400;
    end
end

```

```

Vm2=U272.*Zop;
Vk2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zk.*sinh(gg.*aa2(m2));
U282=(Vm2./Vk2);
end
end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE A DROITE:
%* PIEZO 3 ACTIF
%*****
for y=1:1:i
    c1=Z12(y).*v12(y);
    CC2=(c1.*v12(y).*Kr2(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd2(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v12(y);
    KK1=Kr2(y).*((f./fr).^Nd2(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1
        Vn1=U203.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa3(y))+Z26.*sinh(gg.*aa3(y));
        U213=(Vn1./Vd1);
    elseif y==2
        Vn2=U213.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa3(y))+Z25.*sinh(gg.*aa3(y));
        U223=(Vn2./Vd2);
    elseif y==3
        ZE=Zn4./Zd4;
        Vn3=U223.*Zop;
        Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa3(y))+ZE.*sinh(gg.*aa3(y));
        U233=(Vn3./Vd3);
    end
end
Vn4=U233.*Z04;
Vd4=Z04.*cosh(gk3.*ap4)+Z2.*sinh(gk3.*ap4);
U243=(Vn4./Vd4);
for m2=1:1:id
    c1=Zo2(m2).*vv2(m2);
    CC2=(c1.*vv2(m2).*KKr2(m2)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd(m2));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./vv2(m2);
    KK1=KKr2(m2).*((f./fr).^Nd(m2));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if m2==1
        if m2==id
            Zy=400;
        end
        Vn1=U243.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zy.*sinh(gg.*aa2(m2));
        U253=(Vn1./Vd1);
    elseif m2==2
        if m2==id

```

```

        ZL=400;
    end
    Vn2=U253.*Zop;
    Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+ZL.*sinh(gg.*aa2(m2));
    U263=(Vn2./Vd2);
elseif m2==3
    if m2==id
        Zg=400;
    end
    Vn2=U263.*Zop;
    Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zg.*sinh(gg.*aa2(m2));
    U273=(Vn2./Vd2);
elseif m2==4
    Zk=400;
    Vn2=U273.*Zop;
    Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(m2))+Zk.*sinh(gg.*aa2(m2));
    U283=(Vn2./Vd2);
end
end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE: PIEZO 4 ACTIF
%* A DROITE
%*****
for y=1:1:id
    c1=Zo2(y).*w2(y);
    CC2=(c1.*w2(y).*KKr2(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./w2(y);
    KK1=KKr2(y).*((f./fr).^Nd(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1
        if y==id
            Zy=400;
        end
        Vn1=U244.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa2(y))+Zy.*sinh(gg.*aa2(y));
        U254=(Vn1./Vd1);
    elseif y==2
        if y==id
            ZL=400;
        end
        Vn2=U254.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(y))+ZL.*sinh(gg.*aa2(y));
        U264=(Vn2./Vd2);
    elseif y==3
        if y==id
            Zg=400;
        end
        Vn2=U264.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(y))+Zg.*sinh(gg.*aa2(y));
        U274=(Vn2./Vd2);
    end
end

```

```

elseif y==4;
    Zk=400;
    Vn2=U274.*Zop;
    Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa2(y))+Zk.*sinh(gg.*aa2(y));
    U284=(Vn2./Vd2);
end
end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE: PIEZO 1 ACTIF
%* A GAUCHE
%*****
for y=1:1:ia
    c1=Zao(y).*va(y);
    CC2=(c1.*va(y).*Kra(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./va(y);
    KK1=Kra(y).*((f./fr).^Nap(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1
        if y==ia
            Za2=400;
        end
        Vn2=U91.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za2.*sinh(gg.*aa(y));
        U81=(Vn2./Vd2);
    elseif y==2
        if y==ia
            Za3=400;
        end
        Vn2=U81.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za3.*sinh(gg.*aa(y));
        U71=(Vn2./Vd2);
    elseif y==3
        if y==ia
            Za4=400;
        end
        Vn2=U71.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za4.*sinh(gg.*aa(y));
        U61=(Vn2./Vd2);
    elseif y==4
        if y==ia
            ZE=400;
        end
        Vn2=U61.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+ZE.*sinh(gg.*aa(y));
        U51=(Vn2./Vd2);
    end
end
end

```

```

%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE: PIEZO 2 ACTIF
%* A GAUCHE
%*****
for t=i3:-1:1
    c1=Z14(t).*v14(t);
    CC2=(c1.*v14(t).*Kr4(t)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(t));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v14(t);
    KK1=Kr4(t).*((f./fr).^Nd4(t));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if t==3
        Vn1=U132.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa5(t))+Za19.*sinh(gg.*aa5(t));
        U122=(Vn1./Vd1);
    elseif t==2
        Vn2=U122.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa5(t))+Za20.*sinh(gg.*aa5(t));
        U112=(Vn2./Vd2);
    elseif t==1
        ZE=Zn4./Zd4;
        Vn3=U112.*Zop;
        Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa5(t))+ZE.*sinh(gg.*aa5(t));
        U102=(Vn3./Vd3);
    end
end
%*****PAR SIMETRIE*****
ZA1=Zf;
Vn4=U102.*Z01;
Vd4=Z01.*cosh(go1.*ap)+ZA1.*sinh(go1.*ap);
U92=(Vn4./Vd4);
for y=1:1:ia
    c1=Zao(y).*va(y);
    CC2=(c1.*va(y).*Kra(y)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nap(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./va(y);
    KK1=Kra(y).*((f./fr).^Nap(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1
        if y==ia
            Za2=400;
        end
        Vn1=U92.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za2.*sinh(gg.*aa(y));
        U82=(Vn1./Vd1);
    elseif y==2
        if y==ia
            Za3=400;
        end
        Vn2=U82.*Zop;

```

```

Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za3.*sinh(gg.*aa(y));
U72=(Vn2./Vd2);
elseif y==3
    if y==ia
        Za4=400;
    end
    Vn2=U72.*Zop;
    Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za4.*sinh(gg.*aa(y));
    U62=(Vn2./Vd2);
elseif y==4
    if y==ia
        Zk=400;
    end
    Vn2=U62.*Zop;
    Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Zk.*sinh(gg.*aa(y));
    U52=(Vn2./Vd2);
end
end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE:
%* PIEZO 3 ACTIF A GAUCHE
%*****
for T1=i2:-1:1
    c1=Z13(T1).*v13(T1);
    CC2=(c1.*v13(T1).*Kr3(T1)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd3(T1));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v13(T1);
    KK1=Kr3(T1).*((f./fr).^Nd3(T1));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if T1==5
        Vn1=U193.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za24.*sinh(gg.*aa4(T1));
        U183=(Vn1./Vd1);
    elseif T1==4
        Vn1=U183.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za23.*sinh(gg.*aa4(T1));
        U173=(Vn1./Vd1);
    elseif T1==3
        Vn1=U173.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za22.*sinh(gg.*aa4(T1));
        U163=(Vn1./Vd1);
    elseif T1==2
        Vn1=U163.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za21.*sinh(gg.*aa4(T1));
        U153=(Vn1./Vd1);
    elseif T1==1
        ZE=Znn1./Zdd1;
        Vn1=U153.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+ZE.*sinh(gg.*aa4(T1));
        U143=(Vn1./Vd1);
    end
end

```

```

end
Vn1=U143.*Z02;
Vd1=Z02.*cosh(gk1.*ap2)+Za18.*sinh(gk1.*ap2);
U133=(Vn1./Vd1);
for T=i3:-1:1
    c1=Z14(T).*v14(T);
    CC2=(c1.*v14(T).*Kr4(T)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nd4(T));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v14(T);
    KK1=Kr4(T).*((f./fr). ^ Nd4(T));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if T==3
        Vn1=U133.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+Za19.*sinh(gg.*aa5(T));
        U123=(Vn1./Vd1);
    elseif T==2
        Vn2=U123.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+Za20.*sinh(gg.*aa5(T));
        U113=(Vn2./Vd2);
    elseif T==1
        ZE=Zn4./Zd4;
        Vn3=U113.*Zop;
        Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+ZE.*sinh(gg.*aa5(T));
        U103=(Vn3./Vd3);
    end
end
end
%*****PAR SIMETRIE*****
ZA1=Zf;
Vn4=U103.*Z01;
Vd4=Z01.*cosh(go1.*ap)+ZA1.*sinh(go1.*ap);
U93=(Vn4./Vd4);
for y=1:1:ia
    c1=Zao(y).*va(y);
    CC2=(c1.*va(y).*Kra(y)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nap(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./va(y);
    KK1=Kra(y).*((f./fr). ^ Nap(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1
        if y==ia
            Za2=400;
        end
        Vn1=U93.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za2.*sinh(gg.*aa(y));
        U83=(Vn1./Vd1);
    elseif y==2
        if y==id
            Za3=400;
        end
        Vn1=U83.*Zop;

```



```

Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za3.*sinh(gg.*aa(y));
U73=(Vn1./Vd1);
elseif y==3
    if y==id
        Za4=400;
    end
    Vn1=U73.*Zop;
    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za4.*sinh(gg.*aa(y));
    U63=(Vn1./Vd1);
elseif y==4
    if y==ia
        Zk=400;
    end
    Vn1=U63.*Zop;
    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Zk.*sinh(gg.*aa(y));
    U53=(Vn1./Vd1);
end
end
%*****
%* CALCUL DES VITESSES ACOUSTIQUES SUR CHAQUE FACE: PIEZO 4 ACTIF
%* A GAUCHE
%*****
for K=i:-1:1
    c1=Z12(K).*v12(K);
    CC2=(c1.*v12(K).*Kr2(K)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd2(K));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v12(K);
    KK1=Kr2(K).*((f./fr).^Nd2(K));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if K==3
        Vn1=U234.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa3(K))+Za27.*sinh(gg.*aa3(K));
        U224=(Vn1./Vd1);
    elseif K==2
        Vn1=U224.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa3(K))+Za26.*sinh(gg.*aa3(K));
        U214=(Vn1./Vd1);
    elseif K==1
        ZE=Znn2./Zdd2;
        Vn1=U214.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa3(K))+ZE.*sinh(gg.*aa3(K));
        U204=(Vn1./Vd1);
    end
end
Vn1=U204.*Z03;
Vd1=Z03.*cosh(gk2.*ap3)+Za25.*sinh(gk2.*ap3);
U194=(Vn1./Vd1);
for T1=i2:-1:1
    c1=Z13(T1).*v13(T1);
    CC2=(c1.*v13(T1).*Kr3(T1)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd3(T1));
    c=c1+j.*CC2;

```

```

KKo=W./v13(T1);
KK1=Kr3(T1).*((f./fr).^Nd3(T1));
gg=(KK1+j.*KKo);
Zop=c.*gg./(j.*W);
if T1==5
    Vn1=U194.*Zop;
    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za24.*sinh(gg.*aa4(T1));
    U184=(Vn1./Vd1);
elseif T1==4
    Vn1=U184.*Zop;
    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za23.*sinh(gg.*aa4(T1));
    U174=(Vn1./Vd1);
elseif T1==3
    Vn1=U174.*Zop;
    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za22.*sinh(gg.*aa4(T1));
    U164=(Vn1./Vd1);
elseif T1==2
    Vn1=U164.*Zop;
    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+Za21.*sinh(gg.*aa4(T1));
    U154=(Vn1./Vd1);
elseif T1==1
    ZE=Znn1./Zdd1;
    Vn1=U154.*Zop;
    Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa4(T1))+ZE.*sinh(gg.*aa4(T1));
    U144=(Vn1./Vd1);
end
end
Vn1=U144.*Z02;
Vd1=Z02.*cosh(gk1.*ap2)+ZA11.*sinh(gk1.*ap2);
U134=(Vn1./Vd1);
for T=i3:-1:1
    c1=Z14(T).*v14(T);
    CC2=(c1.*v14(T).*Kr4(T)./(f.*pi)).*((f./fr).^Nd4(T));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./v14(T);
    KK1=Kr4(T).*((f./fr).^Nd4(T));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if T==3
        Vn1=U134.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+Za19.*sinh(gg.*aa5(T));
        U124=(Vn1./Vd1);
    elseif T==2
        Vn2=U124.*Zop;
        Vd2=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+Za20.*sinh(gg.*aa5(T));
        U114=(Vn2./Vd2);
    elseif T==1
        ZE=Zn4./Zd4;
        Vn3=U114.*Zop;
        Vd3=Zop.*cosh(gg.*aa5(T))+ZE.*sinh(gg.*aa5(T));
        U104=(Vn3./Vd3);
    end
end

```

```

end
%*****PAR SIMETRIE*****
ZA1=Zf;
Vn4=U104.*Z01;
Vd4=Z01.*cosh(go1.*ap)+ZA1.*sinh(go1.*ap);
U94=(Vn4./Vd4);
for y=1:1:ia
    c1=Zao(y).*va(y);
    CC2=(c1.*va(y).*Kra(y)./(f.*pi)).*((f./fr). ^ Nap(y));
    c=c1+j.*CC2;
    KKo=W./va(y);
    KK1=Kra(y).*((f./fr). ^ Nap(y));
    gg=(KK1+j.*KKo);
    Zop=c.*gg./(j.*W);
    if y==1
        if y==ia
            Za2=400;
        end
        Vn1=U94.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za2.*sinh(gg.*aa(y));
        U84=(Vn1./Vd1);
    elseif y==2
        if y==ia
            Za3=400;
        end
        Vn1=U84.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za3.*sinh(gg.*aa(y));
        U74=(Vn1./Vd1);
    elseif y==3
        if y==ia
            Za4=400;
        end
        Vn1=U74.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Za4.*sinh(gg.*aa(y));
        U64=(Vn1./Vd1);
    elseif y==4
        if y==ia
            Zk=400;
        end
        Vn1=U64.*Zop;
        Vd1=Zop.*cosh(gg.*aa(y))+Zk.*sinh(gg.*aa(y));
        U54=(Vn1./Vd1);
    end
end
end
%*****
%* THEOREME DE SUPERPOSITION POUR LES VITESSES
%*****
U5=abs(U51+U52+U53+U54);
U6=abs(U61+U62+U63+U64);
U7=abs(U71+U72+U73+U74);
U8=abs(U81+U82+U83+U84);
U9=abs(U91+U92+U93+U94);

```

```

U10=abs(U101+U102+U103+U104);
U11=abs(U111+U112+U113+U114);
U12=abs(U121+U122+U123+U124);
U13=abs(U131+U132+U133+U134);
U14=abs(U141+U142+U143+U144);
U15=abs(U151+U152+U153+U154);
U16=abs(U161+U162+U163+U164);
U17=abs(U171+U172+U173+U174);
U18=abs(U181+U182+U183+U184);
U19=abs(U191+U192+U193+U194);
U20=abs(U201+U202+U203+U204);
U21=abs(U211+U212+U213+U214);
U22=abs(U221+U222+U223+U224);
U23=abs(U231+U232+U233+U234);
U24=abs(U241+U242+U243+U244);
U25=abs(U251+U252+U253+U254);
U26=abs(U261+U262+U263+U264);
U27=abs(U271+U272+U273+U274);
U28=abs(U281+U282+U283+U284);
%*****
%* CALCUL DES VITESSES POUR LES IMPEDANCES
%*****
U1A=U91+U92+U93+U94;
U1B=U101+U102+U103+U104;
U2A=U131+U132+U133+U134;
U2B=U141+U142+U143+U144;
U3A=U191+U192+U193+U194;
U3B=U201+U202+U203+U204;
U4A=U231+U232+U233+U234;
U4B=U241+U242+U243+U244;
%*****
%* IMPEDANCE ELECTRIQUE DES TRANSDUCTEURS
%*****
I1=j.*W.*Co.*(Vs-h.*(U1A-U1B))./(j.*W));
I2=j.*W.*Co2.*(Vs-h2.*(U2A-U2B))./(j.*W));
I3=j.*W.*Co3.*(Vs-h3.*(U3A-U3B))./(j.*W));
I4=j.*W.*Co4.*(Vs-h4.*(U4A-U4B))./(j.*W));
Ze1=abs(Vs./(I1+I2));
Ze2=abs(Vs./(I3+I4));
Z=(Vs./(I1+I2+I3+I4));
X=length(f);
A=0;
for l=1:1:X
    A=A+1;
    if real(Z(A))<0
        ZR(A)=conj(Z(A));
        ZR(A)=-ZR(A);
    else
        ZR(A)=Z(A);
    end
end
ZRT=abs(ZR);

```

```

ArgR=(angle(ZR)).*180./pi;
%*****\n')
%*   CALCUL MAX-MIN IMPEDANCE DU RESONATEUR   *\n')
%*****\n')
npt=length(f);
D=ZRT(2)-ZRT(1);
if D>0
    Mn=[ZRT(1);f(1)];
    Mx=[];
else
    Mx=[ZRT(1);f(1)];
    Mn=[];
end
l=2;
while l+1<npt
    D=ZRT(l+1)-ZRT(l);
    Max=[];
    while D>0 & l+1<npt
        Max=[ZRT(l+1);f(l+1)];
        l=l+1;
        D=ZRT(l+1)-ZRT(l);
    end
    if l+1==npt
        Mx=[Mx[ZRT(l+1);f(l+1)]];
    else
        Mx=[Mx Max];
        Min=[];
        while D<0 & l+1<npt
            Min=[ZRT(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D=ZRT(l+1)-ZRT(l);
        end
        if l+1==npt
            Mn=[Mn[ZRT(l+1);f(l+1)]];
        else
            Mn=[Mn Min];
        end
    end
end
end
[m,n]=size(Mx);
[q,p]=size(Mn);
for X=1:1:100;

```

```

fprintf(' *****\n')
fprintf(' *  UNIVERSITE DU QUEBEC A TROIS RIVIERES * \n')
fprintf(' *  LABORATOIRE D'ULTRASONIQUE ET CAPTEURS * \n')
fprintf(' *  RESONATEUR ULTRASONORE: 4 PIEZOS      * \n')
fprintf('*****\n')
fprintf('*  SOLUTION POUR L'IMPEDANCE ET VITESSE      * \n')
fprintf('*****\n')
fprintf('*  1.-IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 1          * \n')
fprintf('*  2.-IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 2          * \n')
fprintf('*  3.-IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 3          * \n')
fprintf('*  4.-IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 4          * \n')
fprintf('*  5.-IMPEDANCE ELECTRIQUE TRANSDUCTEUR 1    * \n')
fprintf('*  6.-IMPEDANCE ELECTRIQUE TRANSDUCTEUR 2    * \n')
fprintf('*  7.-IMPEDANCE ELECTRIQUE RESONATEUR        * \n')
fprintf('*  8.-PLUSIEURS GRAPHIQUES SUR L ECRAN      * \n')
fprintf('*  9.-VITESSE ACOUSTIQUE AUX INTERFACES     * \n')
fprintf('*****\n')
L=input('CHOISIR GRAPHIQUE (1,2,3,4,5,6,7,8,...), "0" SORTIR DU PROGRAMME=')
if L==0
    break
elseif L==1
    axis([50e3,150e3,0,4])
    semilogy(f,ZZ1,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 1')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    grid
    pause
elseif L==2
    semilogy(f,ZZ2,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 2')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    grid
    pause
elseif L==3
    semilogy(f,ZZ3,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 3')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    grid
    pause
elseif L==4
    %load b:92110512
    %axis([50,150,3,6])
    semilogy(f,ZZ4,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE PIEZO 4')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    grid
    pause
elseif L==5

```

```

semilogy(f,Ze1,'g')
title('IMPEDANCE ELECTRIQUE TRANSDUCTEUR 1')
xlabel('FREQUENCE EN Hz')
ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
grid
pause
elseif L==6
    semilogy(f,Ze2,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE TRANSDUCTEUR 2')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    grid
    pause
elseif L==7
    semilogy(f,ZRT,'g')
    title('IMPEDANCE ELECTRIQUE RESONATEUR')
    xlabel('FREQUENCE EN Hz')
    ylabel('IMPEDANCE EN Ohms')
    grid
    pause
    k=input('Vous voulez les max-min de l'impedance(1/0)=')
    if K==1
        for K=1:1:n
            fprintf('*****\n')
            fprintf('*      VALEURS MAX DE ZRT      *\n')
            fprintf('*****\n')
            fprintf('Valeur MaxZ=%e\n',Mx(1,K))
            fprintf('Valeur Freq.=%e\n',Mx(2,K))
            pause
        end
        for R=1:1:p
            fprintf('*****\n')
            fprintf('*      VALEUR MIN. DE ZRT      *\n')
            fprintf('*****\n')
            fprintf('Valeur MinZ=%e\n',Mn(1,R))
            fprintf('Valeur Freq.=%e\n',Mn(2,R))
            pause
        end
    end
end
elseif L==8
    subplot(221),semilogy(f,ZZ1,'r')
    title('Impedance piezo 1')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Impedance en Ohms')
    subplot(222),semilogy(f,ZZ2,'g')
    title('Impedance piezo 2')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Impedance en Ohms')
    subplot(223),semilogy(f,ZZ3,'g')
    title('Impedance piezo 3')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Impedance en Ohms')

```

```

subplot(224),semilogy(f,ZZ4,'r')
title('Impedance piezo 4')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Impedance en Ohms')
pause
clg
hold off
subplot(221),semilogy(f,Ze1,'g')
title('Impedance transducteur 1')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Impedance en Ohms')
subplot(222),semilogy(f,Ze2,'g')
title('Impedance Transducteur 2')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Impedance en Ohms')
subplot(223),semilogy(f,ZRT,'g')
title('Impedance resonateur')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Impedance en Ohms')
subplot(224),plot(f,ArgR,'w')
title('Arg. imp. resonateur')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Arg. en degres')
pause
clg
hold off
elseif L==9
p=input('QUELLE VITESSE=')
if p==5
U=U5;
semilogy(f,U5,'g')
title('Vitesse acoustique U5')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
%grid
pause
elseif p==6
U=U6;
semilogy(f,U6,'g')
title('Vitesse acoustique U6')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
pause
elseif p==7
U=U7;
semilogy(f,U7,'g')
title('Vitesse acoustique U7')
xlabel('Frequence en Hz')
ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
pause

```



```

elseif p==8
    U=U8;
    semilogy(f,U8,'g')
    title('Vitesse acoustique U8')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==9
    U=U9;
    semilogy(f,U9,'g')
    title('Vitesse acoustique U9')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==10
    U=U10;
    semilogy(f,U10,'g')
    title('Vitesse acoustique U10')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==11
    U=U11;
    semilogy(f,U11,'g')
    title('Vitesse acoustique U11')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==12
    U=U12;
    semilogy(f,U12,'g')
    title('Vitesse acoustique U12')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==13
    U=U13;
    semilogy(f,U13,'g')
    title('Vitesse acoustique U13')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==14
    U=U14;
    semilogy(f,U14,'g')
    title('Vitesse acoustique U14')

```

```

    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==15
    U=U15;
    semilogy(f,U15,'g')
    title('Vitesse acoustique U15')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==16
    U=U16;
    semilogy(f,U16,'g')
    title('Vitesse acoustique U16')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==17
    U=U17;
    semilogy(f,U17,'g')
    title('Vitesse acoustique U17')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==18
    U=U18;
    semilogy(f,U18,'g')
    title('Vitesse acoustique U18')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==19
    U=U19;
    semilogy(f,U19,'g')
    title('Vitesse acoustique U19')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause
elseif p==20
    U=U20;
    semilogy(f,U20,'g')
    title('Vitesse acoustique U20')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
% grid
    pause

```

```

elseif p==21
    U=U21;
    semilogy(f,U21,'g')
    title('Vitesse acoustique U21')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    % grid
    pause
elseif p==22
    U=U22;
    semilogy(f,U22,'g')
    title('Vitesse acoustique U22')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    pause
elseif p==23
    U=U23;
    semilogy(f,U23,'g')
    title('Vitesse acoustique U23')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    % grid
    pause
elseif p==24
    U=U24;
    semilogy(f,U24,'g')
    title('Vitesse acoustique U24')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    % grid
    pause
elseif p==25
    U=U25;
    semilogy(f,U25,'g')
    title('Vitesse acoustique U25')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    % grid
    pause
elseif p==26
    U=U26;
    semilogy(f,U26,'g')
    title('Vitesse acoustique U26')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    % grid
    pause
elseif p==27
    U=U27;
    semilogy(f,U27,'g')
    title('Vitesse acoustique U27')
    xlabel('Frequence en Hz')

```

```

        ylabel('Vitesse en m/s')
    % grid
    pause
elseif p==28
    U=U28;
    semilogy(f,U28,'g')
    title('Vitesse acoustique U28')
    xlabel('Frequence en Hz')
    ylabel('Vitesse en m/s')
    % grid
    pause
end
F=input('Vous voulez les max-min de la vitesse(1/0)=')
if F==1
    fprintf('*****\n')
    fprintf('*   CALCUL EN COURS           *\n')
    fprintf('*****\n')
    npt=length(f);
    D=U(2)-U(1);
    if D>0
        Mn=[U(1);f(1)];
        Mx=[];
    else
        Mx=[U(1);f(1)];
        Mn=[];
    end
    l=2;
    while l+1<npt
        D=U(l+1)-U(l);
        Max=[];
        while D>0 & l+1<npt
            Max=[U(l+1);f(l+1)];
            l=l+1;
            D=U(l+1)-U(l);
        end
        if l+1==npt
            Mx=[Mx U(l+1);f(l+1)];
        else
            Mx=[Mx Max];
            Min=[];
            while D<0 & l+1<npt
                Min=[U(l+1);f(l+1)];
                l=l+1;
                D=U(l+1)-U(l);
            end
            if l+1==npt
                Mn=[Mn U(l+1);f(l+1)];
            else
                Mn=[Mn Min];
            end
        end
    end
end
end

```

